



HOCHSCHULE OSNABRÜCK

UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Fakultät Ingenieurwissenschaften und Informatik
Maschinenbau

Bachelorarbeit

Entwicklung eines Prototyps eines Sekundärreflektors für ein Solarturmkraftwerk mit Flüssigsalzreceiver

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. Markus Eck
Fakultät Ingenieurwissenschaften und Informatik
Leiter des Labors für Angewandte Thermodynamik
Hochschule Osnabrück

Zweitprüfer: Dipl. Ing. Ralf Uhlig
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
Institut für Solarforschung

Bearbeiter: Johannes Clar
Matrikelnummer: 822969

Ausgabedatum: 29.05.2020
Abgabedatum: 08.10.2020

Abstract

Secondary reflectors on solar tower power plants with molten salt receivers are intended to reflect the solar radiation directed by the heliostats onto the absorber one more time and thus focus more on the absorber. The intention is to increase the cost and energy efficiency of these power plants. As part of the SolSec project, the feasibility of the secondary reflectors is to be examined. This thesis follows previous work packages of the SolSec project and deals with the construction and prototype development of the secondary reflectors.

To establish a basis for the construction process, a list of requirements was drawn up and the secondary reflector was divided into functional assemblies. Using a numerical preliminary examination of the reflective surface, the constructional key aspects of each assembly were worked out. Individual concepts have been developed for these key aspects and compared with one another. The most promising concepts for the secondary reflector were designed using numerical analyzes. The stress-critical points on the reflection surface were also determined. On this basis, an overall design of the reflection surface was put together.

Finally, recommendations for the design of the prototype are given and all influences that should be considered at the system boundaries are listed.

Zusammenfassung

Durch Sekundärreflektoren an Solarturmkraftwerken mit Flüssigsalzreceiver soll die von den Heliostaten auf den Absorber gerichtete Solarstrahlung ein weiteres Mal reflektiert und damit stärker auf den Absorber fokussiert werden. Das Ziel dabei ist eine Steigerung der Kosten- und Energieeffizienz dieser Kraftwerke. Im Rahmen des Projekts SolSec soll die Umsetzbarkeit der Sekundärreflektoren untersucht werden. Diese Arbeit schließt an vorangegangene Arbeitspakete des SolSec-Projekts an und bearbeitet die Konstruktion der Sekundärreflektoren sowie die Entwicklung eines Prototyps.

Um eine Grundlage für den Konstruktionsprozess zu schaffen, wurde eine Anforderungsliste erstellt und der Sekundärreflektor in funktionale Baugruppen unterteilt. Mittels einer numerischen Voruntersuchung der Reflexionsfläche konnten die konstruktiven Schwerpunkte jeder Baugruppe erarbeitet werden. Zu diesen Schwerpunkten sind Einzelkonzepte entwickelt und miteinander verglichen worden. Die vielversprechendsten Konzepte für die Schwerpunkte der Reflexionsfläche wurden anhand numerischer Analysen für den Einsatz als Sekundärreflektor ausgelegt. Dabei sind auch die belastungskritischen Stellen der Reflexionsfläche ermittelt worden. Auf dieser Basis wurde ein Gesamtentwurf der Reflexionsfläche zusammengestellt.

Abschließend werden Empfehlungen für die Gestalt des Prototyps gegeben und alle Einflüsse, die an den Systemgrenzen berücksichtigt werden sollten, aufgelistet.

Erklärung

Ich erkläre hiermit an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht. Die Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch noch nicht veröffentlicht.

Stuttgart, den 8.10.2020

Ort, Datum

J. Uo

Unterschrift

Inhaltsverzeichnis

Abstract.....	I
Zusammenfassung.....	II
Erklärung	III
Abbildungsverzeichnis	VI
Tabellenverzeichnis	VIII
Erläuterung der Formelzeichen	IX
Abkürzungsverzeichnis	X
1. Einführung	1
2. Stand der Technik	3
2.1. Bekannte Systeme.....	3
2.2. Projekt RAISELIFE	4
2.3. Projekt SolSec	5
3. Aufgabenstellung und Vorgehensweise.....	7
3.1. Aufgabenstellung	7
3.2. Vorgehensweise	7
4. Konstruktion des Sekundärreflektors.....	8
4.1. Baugruppen	8
4.2. Konstruktive Schwerpunkte.....	9
4.3. Anforderungen	10
4.4. Analysemethodik.....	14
4.5. Auslegung der Segmentgeometrie	18
4.6. Maßnahmen für eine günstigere Temperaturverteilung	24
4.7. Lagerung der Segmente	27
4.8. Kontaktstelle zwischen den Segmenten – radial	32
4.9. Kontaktstelle zwischen den Segmenten – tangential.....	37
4.10. Gesamtentwurf der Reflexionsfläche.....	38
5. Konstruktionsempfehlungen für den Prototyp.....	41
5.1. Empfehlungen zur Gestalt.....	41

5.2. Empfehlungen zu den Systemgrenzen.....	41
6. Fazit.....	44
7. Kritik.....	44
8. Ausblick	45
9. Literaturverzeichnis	46
10. Anhang.....	49

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schematischer Aufbau eines Solarturmkraftwerks mit Wärmespeichern (Zhu und Libby 2017).....	1
Abbildung 2: Seitenansicht eines Receivers ohne (a) und mit einem Sekundärreflektor (b).....	2
Abbildung 3: Mitte: Aufbau eines linearen Fresnel-Kollektors; oben rechts: detaillierte Darstellung des Kollektors (Moghimi et al. 2017).....	3
Abbildung 4: Prototyp des Sekundärkonzentrators des SolTrec II Projekts (Uhlig et al. 2015).....	4
Abbildung 5: Bemaßtes Modell des Receivers mit Sekundärreflektor (Gerkamp 2020)	4
Abbildung 6: Empfohlene Offsetverteilung über den Receiver (Konzentrationsverteilung nicht an Offset angepasst) (Schöttl 2020).....	6
Abbildung 7: Beschrifteter Grobentwurf der Sekundärreflektorelemente oben (links) und unten (rechts) mit eingetragener Strömungsrichtung	6
Abbildung 8: Schematische Darstellung der Funktionsstruktur des Sekundärreflektors	8
Abbildung 9: Einfache Geometrie der Reflexionsfläche und der Kanalkontur mit nummerierten Flächen.....	14
Abbildung 10: Lagerungsprinzip 1	16
Abbildung 11: Lagerungsprinzip 2	16
Abbildung 12: Lagerungsprinzip 3	17
Abbildung 13: 1 %-Dehngrenze von 1.4301 in Abhängigkeit von der Temperatur	18
Abbildung 14: Zeichnung von Modell 1.1 mit Orientierungshilfen.....	19
Abbildung 15: Zeichnung von Modell 1.2.....	19
Abbildung 16: Zeichnung von Modell 1.3.....	20
Abbildung 17: Temperaturverteilung von Modell 1.1	20
Abbildung 18: Ausschnitt der Temperaturverteilung von Modell 1.2.....	21
Abbildung 19: Ausschnitt der Temperaturverteilung von Modell 1.3.....	21
Abbildung 20: Gewähltes Gestaltungsprinzip der Segmente der Reflexionsfläche mit bemaßter Segmentbreite	22
Abbildung 21: Verteilung des Sicherheitsfaktors S über die festgelegte Geometrie	23
Abbildung 22: Vergleich der seitlichen Temperaturgradienten ohne (links) und mit Konvektionsunterdrückung (rechts)	24
Abbildung 23: Konzepte zur Unterdrückung der Konvektion	25
Abbildung 24: Temperaturverlauf über die Segmentbreite bei einer absorbierten Strahlungsintensität von 29 kW/m ²	26
Abbildung 25: Zeichnungen der optimalen Geometrie des Ausgleichsblechs bemaßt	27
Abbildung 26: Funktionsprinzip der gewählten Lagerung.....	28
Abbildung 27: Konstruktive Umsetzung des Lagerungskonzepts RL 5	30
Abbildung 28: Sicherheitsfaktor des innersten Segments mit entwickelter Lagerung	31
Abbildung 29: Durchbiegung in Z-Richtung über der Längenkoordinate bei $R_{th} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ (m}^2\text{K)/W}$	31

Abbildung 30: Verschiebungen in Y-Richtung der innersten beiden Segmente in Strömungsrichtung bei maximalem Temperaturunterschied	33
Abbildung 31: Schematische Darstellung der Konzepte der radialen Kontaktstelle.....	33
Abbildung 32: Temperaturverteilungen der innersten beiden Segmente bei Überlappung mit prinzipieller Seitendarstellung	35
Abbildung 33: Vergleichsspannungen des zweiten Segments bei Überlappung	36
Abbildung 34: Temperaturverteilung auf der reflektierenden Fläche (links); Verformung der reflektierenden Fläche in X-Richtung (rechts)	37
Abbildung 35: Einteilung der Reflektorelemente in Segmente; links: oberer Reflektor; rechts: unterer Reflektor	38
Abbildung 36: Einbauposition des Ausgleichsblechs	39
Abbildung 37: Konstruktive Umsetzung der Lagerung	39
Abbildung 38: Radiale Kontaktstelle nicht überlappend (links) und überlappend (rechts)	40
Abbildung 39: Gesamtentwurf der Reflexionsfläche mit vereinfachter Kanalkontur.....	40
Abbildung 40: Gewählter Ausschnitt eines Elements des oberen Sekundärreflektors für den Prototyp	41
Abbildung 41: Reflexionsfläche im Prototyp mit vereinfachter Kanalkontur und empfohlenen Maßnahmen an den Systemgrenzen.....	43
Abbildung 42: Senkrecht eintreffende Strahlung auf Biegeradien	52
Abbildung 43: Belastungsverläufe des ersten Segments des oberen Reflektors.....	53
Abbildung 44: Belastungsverläufe des zweiten Segments des oberen Reflektors	53
Abbildung 45: Belastungsverläufe des ersten Segments des unteren Reflektors.....	54
Abbildung 46: Belastungsverläufe des zweiten Segments des unteren Reflektors	54
Abbildung 47: Bewegung in X-Richtung des Vorentwurfs	55
Abbildung 48: Bewegung in Y-Richtung des Vorentwurfs	55
Abbildung 49: Bewegung in Z-Richtung des Vorentwurfs	55
Abbildung 50: Ersatzschaubild für die Beschreibung des Drucks an der radialen Kontaktstelle	59
Abbildung 51: Wärmeübergangskoeffizient im Überlappungsspalt in Abhängigkeit von der Spalthöhe	61
Abbildung 52: Relativer Massenstromverlust im Überlappungsspalt über die Spalthöhe	62

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Anforderungsliste Sekundärreflektor	11
Tabelle 2: Thermische Randbedingungen der Voruntersuchung	15
Tabelle 3: Mögliche Kombinationen aus Segmentlänge und Seitenwandhöhe	23
Tabelle 4: Zusätzliche Randbedingungen bei Konzept RUK 1	25
Tabelle 5: Erläuterung der Lagerungskonzepte	29
Tabelle 6: Bewertung der Lagerungskonzepte anhand aller relevanten Kriterien der Anforderungsliste.....	29
Tabelle 7: Kennwerte der Überlappungskonzepte an der innersten radialen Kontaktstelle ...	34
Tabelle 8: Temperaturabhängige Materialdaten von 1.4301 im elastischen Bereich.....	49
Tabelle 9: Belastungsgrenzen von 1.4301.....	50
Tabelle 10: Temperaturverteilung über die Höhe des Absorbers	57
Tabelle 11: Daten für die Berechnung der Erwärmungsdauer	58
Tabelle 12: Daten für die Berechnung des Wärmeübergangskoeffizienten.....	61
Tabelle 13: Übersicht aller thermischen Randbedingungen der radialen Kontaktstelle	63

Erläuterung der Formelzeichen

Formelzeichen	Einheit	Erläuterung
A	m^2	Fläche
b	m	Längenmaß
c		Konzentration
c_p	$\frac{\text{J}}{\text{kg K}}$	spezifische Wärmekapazität
F	N	Kraft
g	$\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$	Erdbeschleunigung
h	m	Längenmaß
I	$\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$	Intensität
k	$\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ K}}$	Wärmedurchgangskoeffizient
K	m	absolute Rauigkeit
l	m	Längenmaß
L	m	Längenmaß
\dot{m}	$\frac{\text{kg}}{\text{s}}$	Massenstrom
Nu		Nusselt-Zahl
Pr		Prandtl-Zahl
\dot{Q}	W	Wärmestrom
R_{th}	$\frac{\text{m}^2 \text{ K}}{\text{W}}$	spezifischer thermischer Kontaktwiderstand
R_a	m	Mittenrauwert
Re		Reynolds-Zahl
R_e	Pa	Streckgrenze
R_m	Pa	Zugfestigkeit
$R_{p1,0}$	Pa	1 %-Dehngrenze
S		Sicherheitsfaktor
T	K	Temperatur
u	m	Verformung
U	m	Umfang
w	$\frac{\text{m}}{\text{s}}$	Strömungsgeschwindigkeit
α	$\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ K}}$	Wärmeübergangskoeffizient
α_i	$^\circ$	Winkel
β	K^{-1}	thermischer Ausdehnungskoeffizient
δ	m	Längenmaß
ε		Emissionsgrad
ζ		Widerstandsbeiwert
ϑ	$^\circ\text{C}$	Temperatur

Abkürzungsverzeichnis

κ	$\frac{\text{m}^2}{\text{s}}$	Temperaturleitfähigkeit
λ		Rohrreibungszahl
$\lambda_{\text{Wärme}}$	$\frac{\text{W}}{\text{m K}}$	Wärmeleitfähigkeit
ν	$\frac{\text{m}^2}{\text{s}}$	kinematische Viskosität
ξ		Hilfswert
ρ		Reflexionsgrad
ρ_D	$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	Dichte
σ	Pa	Spannung
φ	°	Winkel
φ		Sichtfaktor

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Beschreibung
<i>DLR</i>	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
<i>FEM</i>	Finite-Elemente-Methode
<i>HTF</i>	heat transfer fluid
<i>ISE</i>	Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme
<i>LCOE</i>	levelized cost of energy
<i>RAISELIFE</i>	Raising the Lifetime of Functional Materials for Concentrated Solar Power Technology
<i>RL</i>	Reflexionsfläche – Lagerung
<i>RRK</i>	Reflexionsfläche – Radiale Kontaktstelle
<i>RUK</i>	Reflexionsfläche – Konvektionsunterdrückung
<i>SolSec</i>	Entwicklung von Sekundärreflektoren für solare Turmkraftwerke
<i>SolTrec II</i>	Quarzglas-Fenster für HochtemperaturDruckreceiver in Solarturmkraftwerken

1. Einführung

Die auf der Erdoberfläche eintreffende solare Strahlung kann in Solarturmkraftwerken in elektrische Energie umgewandelt werden. Dazu muss die direkt eintreffende Sonnenstrahlung um ein Vielfaches konzentriert werden. Realisiert wird dies durch eine hohe Anzahl 2-achsig beweglicher Spiegel – auch Heliostaten genannt. Diese werden kontinuierlich so ausgerichtet, dass das Abbild der Sonne auf einen Punkt reflektiert wird. An diesem Punkt sitzt ein so genannter Receiver (Strahlungsempfänger), welcher auf einem Turm installiert ist und einen hohen Anteil der eintreffenden Solarstrahlung absorbiert. Die Strahlung wird in Wärme umgewandelt, welche an ein wärmeübertragendes Medium (HTF) abgegeben wird. Bei dem hier betrachteten Kraftwerk wird Flüssigsalz als HTF verwendet. Damit können Temperaturen von etwa 570 °C am Receiveraustritt erreicht werden. Anschließend wird die Wärme an einen Dampfkraftprozess übertragen, in dem über eine Turbine ein Generator angetrieben wird. Nach der Wärmeabgabe darf im Flüssigsalzkreislauf eine Temperatur von ca. 290 °C nicht unterschritten werden, da sonst die Gefahr besteht, dass die Erstarrungstemperatur unterschritten wird und Rohrleitungen verstopfen würden (Baumann et al. 2017).

Ein Vorteil dieser Anlagen ist es, dass die Speicherung der thermischen Energie sehr verlustarm ist. Es werden deshalb Wärmespeicher auf der Heiß- und auf der Kaltseite des Flüssigsalzkreislaufes integriert. Dadurch können zum einen über den Tag auftretende Leistungsschwankungen ausgeglichen werden, wodurch der Lastbetrieb des Dampfkraftprozesses ohne zusätzliche Maßnahmen auf einem konstanten Niveau gehalten werden kann. Zum anderen können die Wärmespeicher so ausgelegt werden, dass Energie für mehrere Stunden Volllastbetrieb vorgehalten werden kann. Damit kann das Kraftwerk auch in der Nacht Strom aus solarer Energie erzeugen (Herrmann et al. 2004).

Der Aufbau des beschriebenen Solarturmkraftwerks ist in Abbildung 1 schematisch dargestellt.

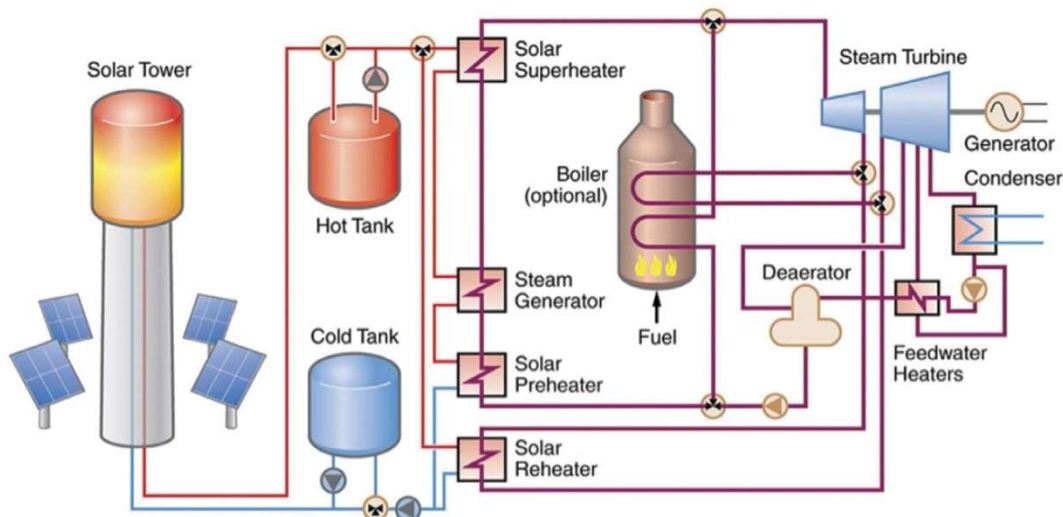


Abbildung 1: Schematischer Aufbau eines Solarturmkraftwerks mit Wärmespeichern (Zhu und Libby 2017)

Die Stromgestehungskosten (LCOE) von Solarturmkraftwerken lagen im Jahr 2018 zwischen 0,10 und 0,14 USD/kWh. Damit lagen sie über den Kosten der Onshore Windkraft (ca. 0,05 USD/kWh), Photovoltaik (ca. 0,09 USD/kWh) und Biomasse (ca. 0,08 USD/kWh) (IRENA 2019). Diese vergleichsweise hohen LCOE sind eine Ursache, weshalb Solarturmkraftwerke

bisher einen nicht nennenswerten Anteil der erneuerbaren Energien aufweisen (IRENA 2020). Um die Wettbewerbsfähigkeit zu steigern, müssen diese LCOE reduziert werden. Dies kann zum einen durch eine Senkung der Kosten, zum anderen durch eine Steigerung des Wirkungsgrads realisiert werden.

Ein möglicher Ansatz hierfür ist die Erweiterung des Receivers durch einen Sekundärreflektor. Dieser ist am oberen und am unteren Rand des Receivers vorgesehen und soll die bereits von den Heliostaten reflektierte Strahlung ein weiteres Mal reflektieren, damit sie auf den Receiver trifft (siehe Abbildung 2).

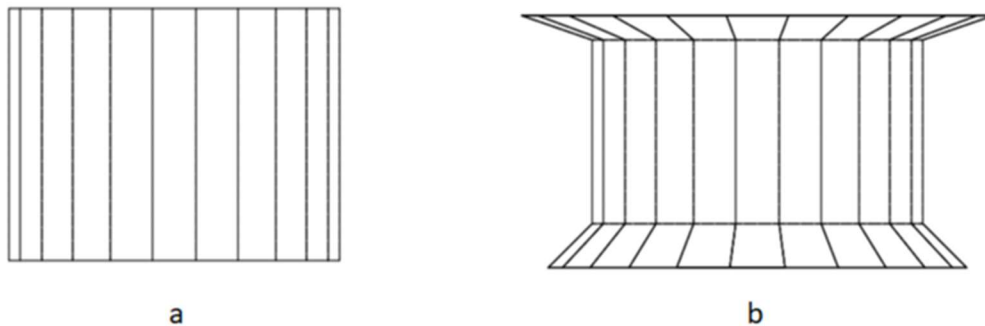


Abbildung 2: Seitenansicht eines Receivers ohne (a) und mit einem Sekundärreflektor (b)

Durch den Sekundärreflektor können die Baugröße des Receivers und die Kosten des daran anliegenden Hochtemperaturstrahlungsschutzes für den Turm reduziert werden (Uhlig et al. 2017b). Eine Abschätzung aller dadurch entstehenden Kosten und Ersparnisse zeigt, dass 5,0 % bis 6,1 % der Investitionskosten für den Receiver eingespart werden können. Da der Receiver ungefähr 7,5 % der Investitionskosten des gesamten Kraftwerks ausmacht (Schöttl et al. 2019), kann der finanzielle Aufwand in der Anschaffung um ca. 0,4 % gesenkt werden.

Weiterhin beeinflusst der Sekundärreflektor auch die auftretenden energetischen Verluste. Bei einer reduzierten Bauhöhe des Receivers steigen die Defokussierungsverluste (Abdrehen von Heliostaten, um maximale Auslastung des Receivers nicht zu überschreiten). Dem gegenüber sinken jedoch die optischen und die thermischen Verluste. Eine Bilanzierung der genannten Verluste hat ergeben, dass die gewinnbringenden Eigenschaften des Sekundärreflektors überwiegen. Im angenommenen Kraftwerk kann durch den Sekundärreflektor die Nettostromerzeugung voraussichtlich um bis zu 1,57 % gesteigert werden (Schöttl et al. 2019).

2. Stand der Technik

2.1. Bekannte Systeme

Das Konzept des Sekundärreflektors ist nicht neu. Es gibt bereits einige Systeme, in denen Erfahrungen mit einem Sekundärreflektor gewonnen werden konnten. Im Folgenden werden zwei unterschiedliche Einsatzgebiete beschrieben.

2.1.1. Sekundärreflektor in linearen Fresnel-Kollektoren

Bei linearen Fresnel-Kollektoren finden mehrere Bauarten von Receivern Verwendung. Besteht der Absorber aus einem einzelnen Rohr, ist die Absorberfläche sehr klein, sodass hohe optische Verluste durch nicht auf den Absorber treffende Strahlung entstehen (auch Spillage genannt). Aus diesem Grund werden einzelne Absorberrohre mit einem Sekundärreflektor kombiniert. Dadurch wird die von den flachen Primärspiegeln kommende Solarstrahlung von einer gerichtet reflektierenden Oberfläche auf das Absorberrohr fokussiert. Dazu ist der Sekundärreflektor in der Ebene senkrecht zum Absorberrohr so geformt, dass die Strahlung auf das Absorberrohr gebündelt wird. In axialer Richtung ändert sich die Geometrie des Receivers nicht, sodass die Strahlung gleichmäßig auf die komplette Länge des Absorberrohrs fokussiert wird (Moghimi et al. 2017). In Abbildung 3 wird die Funktion einer solchen Anlage beschrieben.

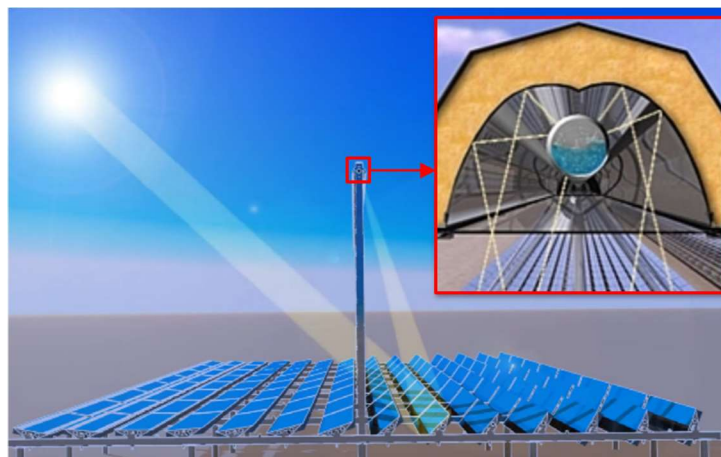


Abbildung 3: Mitte: Aufbau eines linearen Fresnel-Kollektors; oben rechts: detaillierte Darstellung des Kollektors (Moghimi et al. 2017)

2.1.2. Sekundärreflektor an einem Hochtemperatur-Druckreceiver

Im Rahmen des SolTrec II Projekts wurde ein Sekundärkonzentrator für einen Hochtemperatur-Druckreceiver entwickelt. Das Ergebnis dieser Arbeit ist in Abbildung 4 dargestellt.

Der 18-teilige Konzentrator ist trichterförmig vor einem Quarzglasfenster angebracht, welches den Strahlungseintrittsbereich druckdicht abschließt. Um mehrere Konzentratoren nebeneinander installieren zu können, beschreibt die Kontur der Außenkante des Receivers ein Sechseck. Diese Kontur ändert sich in axialer Richtung, sodass das Quarzglasfenster von einem 18-Eck umschlossen wird. Dadurch sind die optischen Eigenschaften des Konzentrators besser als bei einer einfachen sechseckigen Geometrie.

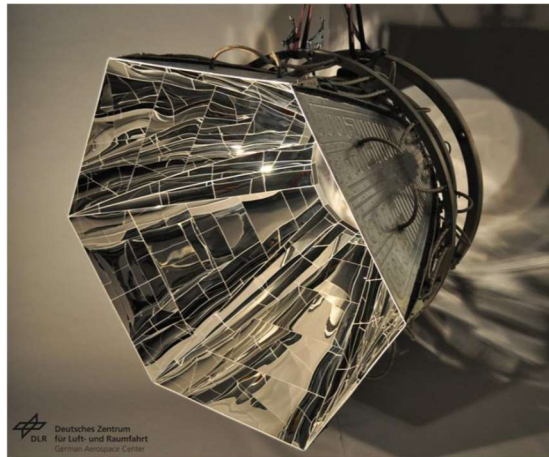


Abbildung 4: Prototyp des Sekundärkonzentrators des SolTrec II Projekts (Uhlig et al. 2015)

Bei dieser Anwendung werden die einzelnen Segmente des Konzentrators gekühlt. Dies geschieht durch eine aktive Wasserkühlung auf der Rückseite der Segmente (Uhlig et al. 2015).

2.2. Projekt RAISELIFE

Das vom DLR koordinierte Projekt RAISELIFE hatte das Ziel, die Lebensdauer von Materialien für Solarthermieanlagen zu erhöhen. Dazu wurden unter anderem eine thermische Analyse und eine Leistungsbewertung eines Sekundärreflektors für ein Solarturmkraftwerk mit externem Flüssigsalzreceiver durchgeführt.

In beiden Untersuchungen wurden einige Randbedingungen für Berechnungen festgelegt. So hat das angenommene Solarturmkraftwerk mit dem Standort Ouarzazate in Marokko eine elektrische Nennleistung von $150 \text{ MW}_{\text{el}}$ bei einer thermischen Leistung von $600 \text{ MW}_{\text{th}}$. Zudem wurden die Abmessungen des Receivers und des dazu passenden Sekundärreflektor festgelegt. Der Receiver ist auf einer Höhe von 200 m installiert und hat die Form eines regelmäßigen 24-Ecks mit einem Außendurchmesser von 26,8 m (Schöttl et al. 2019; Uhlig et al. 2017a). Daran sollen oben und unten je 24 Sekundärreflektorelemente angeordnet werden. In Abbildung 5 sind die Maße eines Receivers mit Sekundärreflektor dargestellt.

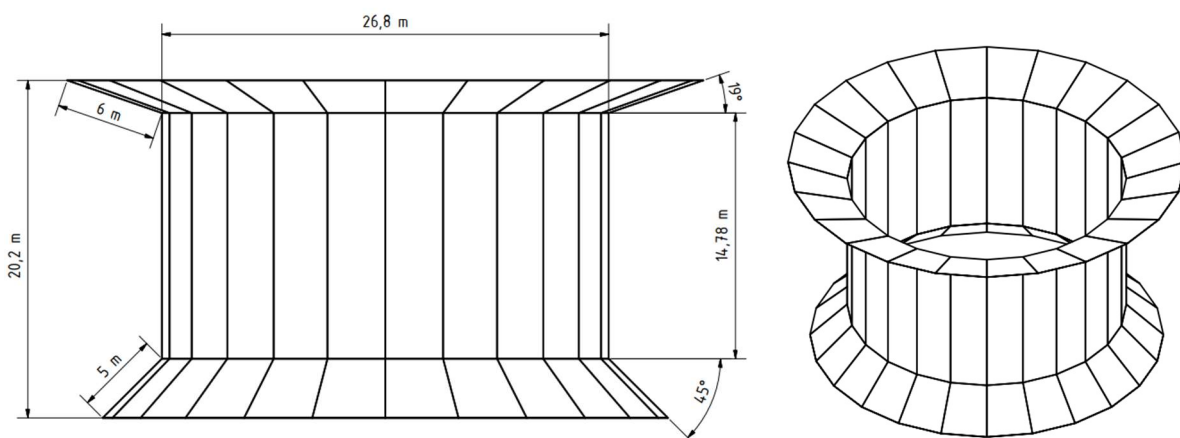


Abbildung 5: Bemaßtes Modell des Receivers mit Sekundärreflektor (Gerkamp 2020)

Die Ergebnisse wurden in den Jahren 2017 und 2018 veröffentlicht und fielen sehr vielversprechend aus, sodass das Projekt SolSec beantragt wurde, um diesen Ansatz weiter zu verfolgen.

2.3. Projekt SolSec

Aufbauend auf das RAISELIFE-Projekt soll im Rahmen des Projekts SolSec untersucht werden, ob Sekundärreflektoren in Solarturmkraftwerken mit Flüssigsalzreceivern eingesetzt werden können. An diesem Projekt arbeitet ein Konsortium aus dem Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE) und dem Institut für Solarforschung des Deutschen Zentrums für Luft und Raumfahrt (DLR). Im ISE werden eine temperaturstabile reflektierende Schicht für die Vorderseite und eine temperaturstabile hochemissive Schicht für die Rückseite des Sekundärreflektors entwickelt. Zudem führt das ISE eine thermohydraulische Analyse des gesamten solaren Systems durch. Aufgabe des DLR ist es, das thermische Design für eine geeignete Kühlung zu erarbeiten sowie einen Prototypen zu entwerfen und zu testen (Gledhill 2019).

Für die thermohydraulische Analyse wurde das Heliostatenfeld definiert. Die Heliostaten wurden dafür kreisförmig um den Turm verteilt und bündelten die Strahlung einer Fläche von etwa 83 ha auf den Receiver. Mittels Raytracing wurden dann die Verteilungen der absorbierten Strahlungskonzentration auf den Receiver und die Sekundärreflektoren ermittelt. Es wurden fünf Analysen durchgeführt, in denen die Heliostaten mit unterschiedlicher Streuung (Offset) auf die Mitte des Receivers – den Äquator – zielten. Es zeigte sich, dass je größer der Offset gewählt wurde, desto homogener ist die Temperaturverteilung auf dem Receiver ausgefallen. Damit nimmt die thermische Belastung des Receivers bei gleicher Leistung ab. Allerdings steigt dabei die Belastung des Sekundärreflektors. Darüber hinaus konnte gezeigt werden, dass die Konzentration auf den oberen Reflektor lokal größer ist. Auf dem unteren Reflektor ist die absorbierte Strahlung homogener verteilt (Schöttl 2020).

Aus einer thermischen Voruntersuchung im Rahmen des RAISELIFE-Projekts geht hervor, dass der Sekundärreflektor Temperaturen von bis zu 400 °C standhalten muss (Uhlig, Fernández-García et al. 2017). Für diesen Einsatz entwickelte das ISE verschiedene Beschichtungen für Edelstahlbleche aus 1.4301. Langzeitbelastungstests haben ergeben, dass ein Reflexionsgrad von ca. 90 % über einen Zeitraum von einem Betriebsjahr (ca. 3200 h) gehalten werden kann (Gledhill 2020). Im Realbetrieb kann jedoch eine Verschmutzung der reflektierenden Fläche auftreten, sodass eine mögliche Reduktion des Reflexionsgrads berücksichtigt werden muss (Buck 2003).

Um ein Design für die aktive und die passive Luftkühlung zu entwickeln, wurden die thermischen Auswirkungen der konzentrierten Solarstrahlung auf die Struktur des Sekundärreflektors untersucht. Die Untersuchung kam zu dem Ergebnis, dass bei einem Reflexionsgrad von $\rho = 90\%$ eine passive Kühlung durch freie Konvektion nicht ausreicht. Es wurde deshalb eine aktive Kühlung auf der Rückseite des Reflektors mit Luft empfohlen, die an der inneren Kante der Reflektorelemente eine Strömungsgeschwindigkeit von mindestens 20 m/s erreichen sollte. Außerdem muss für eine ausreichende Kühlung der Reflexionsfläche eine hochemissive Beschichtung mit einem Emissionsgrad von mindestens 95 % auf mehrere Flächen aufgetragen werden. Unterstützend dazu sollte der Offset zum oberen Reflektor hin eher gering gewählt werden. Zum unteren Reflektor hin kann der Offset sehr groß gewählt werden (Gerkamp 2020). Abbildung 6 zeigt die empfohlene Offsetverteilung über den Receiver. Die dort aufgeführten Werte geben das Verhältnis vom Offset zur Receiverhöhe an.

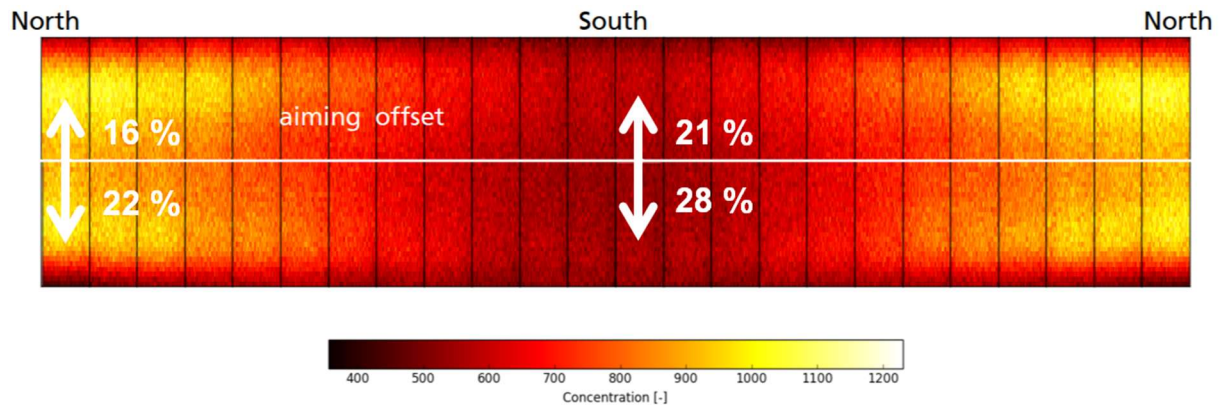


Abbildung 6: Empfohlene Offsetverteilung über den Receiver (Konzentrationsverteilung nicht an Offset angepasst) (Schöttl 2020)

Hinzu kommt, dass für diese Untersuchung die grobe Gestalt der kühlenden Struktur entwickelt werden musste. Um eine ausreichend gute aktive Kühlung der reflektierenden Fläche zu erreichen, wurden auf deren Rückseite Kühlkanäle mit rechteckigem Querschnitt vorgesehen. Diese Kanäle verlaufen von der inneren Kante der Reflektorelemente bis zu deren Außenkante und haben in diese Richtung einen zunehmenden Querschnitt. Über die Breite eines Reflektorelements verteilen sich 10 Strömungskanäle. Des Weiteren wurde ein Vorschlag für die Einteilung eines Reflektorelements in mehrere Segmente gemacht. In Abbildung 7 sind die Geometrien des Grobentwurfs des oberen und des unteren Reflektors erläutert. Darüber hinaus ist in dieser Abbildung die Strömung in den Kühlkanälen dargestellt.

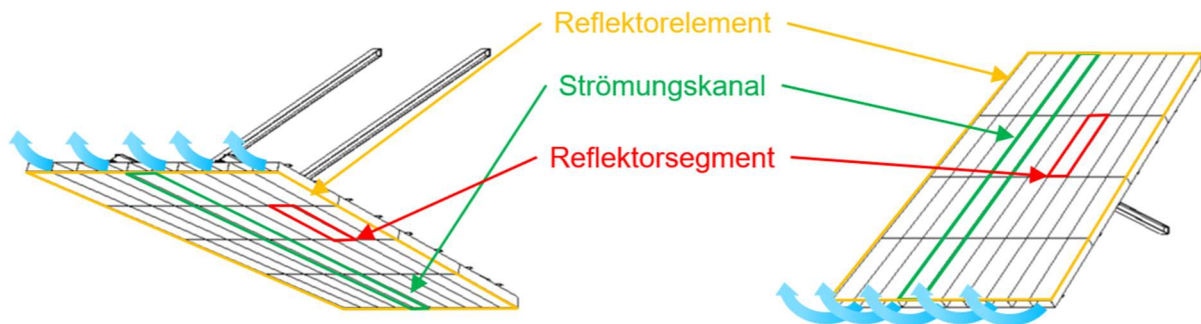


Abbildung 7: Beschrifteter Grobentwurf der Sekundärreflektorelemente oben (links) und unten (rechts) mit eingetragener Strömungsrichtung

3. Aufgabenstellung und Vorgehensweise

3.1. Aufgabenstellung

Diese Arbeit schließt sich an die vorangegangenen Arbeiten des SolSec-Projekts an und befasst sich mit einem Teil des Arbeitspakets 5. Durchgeführt wird diese Arbeit vom Institut für Solarforschung des DLR. Es soll auf Basis der bisherigen Entwicklungs- und Analyseergebnisse eine konzeptionelle Konstruktion des oberen und unteren Sekundärreflektors entworfen werden. Dabei soll der Fokus auf der Realisierbarkeit der Reflektoren liegen. Eine Detailkonstruktion und eine Anpassung an fertigungstechnische Prozesse sind nicht vorgesehen. Aus dieser Konstruktion soll ein Prototyp mit einer reflektierenden Fläche von ca. 1 m² abgeleitet werden. Dieser soll unter Belastung vergleichbare Reaktionen zeigen wie die Sekundärreflektoren im Realbetrieb.

3.2. Vorgehensweise

Zunächst wurde der bestehende Grobentwurf des Sekundärreflektors in Baugruppen unterteilt. In einer anschließenden numerischen Voruntersuchung wurden die Reaktionen der durch externe Einflüsse belasteten Baugruppe ermittelt und Maßnahmen zur Entlastung erarbeitet. Das Ergebnis dieser Voruntersuchung ist ein Vorentwurf dieser Baugruppe.

Aus den gewonnenen Erkenntnissen wurden konstruktive Schwerpunkte für alle Baugruppen abgeleitet, zu denen mehrere Konzepte erarbeitet und miteinander verglichen wurden. Die vielversprechendsten Konzepte der Schwerpunkte der Reflexionsfläche wurden dann für die dort herrschenden Belastungen ausgelegt. Dem folgend wurden alle ausgelegten Konzepte in einem Gesamtentwurf zusammengefasst. Abschließend wurden die daraus gewonnenen Erkenntnisse aufbereitet, sodass Empfehlungen für die Konstruktion des Prototyps gegeben werden konnten.

4. Konstruktion des Sekundärreflektors

4.1. Baugruppen

Aus dem Stand der Technik geht bereits eine grobe Gestaltung des Sekundärreflektors hervor. Damit lässt sich der Aufbau bereits zu Beginn des Konstruktionsvorgangs in sinnvolle Baugruppen einteilen. Dies geschieht in Abhängigkeit der Funktionen, welche der Reflektor erfüllen muss. Damit lassen sich die Baugruppen weitestgehend unabhängig voneinander entwickeln. Es müssen lediglich die Schnittflächen zwischen den einzelnen Baugruppen betrachtet werden.

Die Hauptfunktion des Reflektors ist, die schon konzentrierte Solarstrahlung ein weiteres Mal zu reflektieren. Um dies umzusetzen, sind noch unterstützende Nebenfunktionen nötig. Die Erwärmung des Reflektors durch den absorbierten Teil der Strahlung ist so groß, dass an der reflektierenden Fläche eine Kühlung durch erzwungene Konvektion stattfinden muss. Dazu ist ein Luftmassenstrom zu erzeugen, welcher an der Rückseite der reflektierenden Fläche entlanggeführt werden soll. Weiterhin müssen die Reflektorelemente exakt positioniert werden. Abbildung 8 stellt diese Funktionen zusammen mit deren Schnittflächen schematisch dar. In der bisherigen Gestaltung besteht keine direkte Schnittfläche zwischen der Reflexion der Solarstrahlung und der Positionierung des Reflektors, weshalb diese nur abgeschwächt (gestrichelte Linie) dargestellt wird.

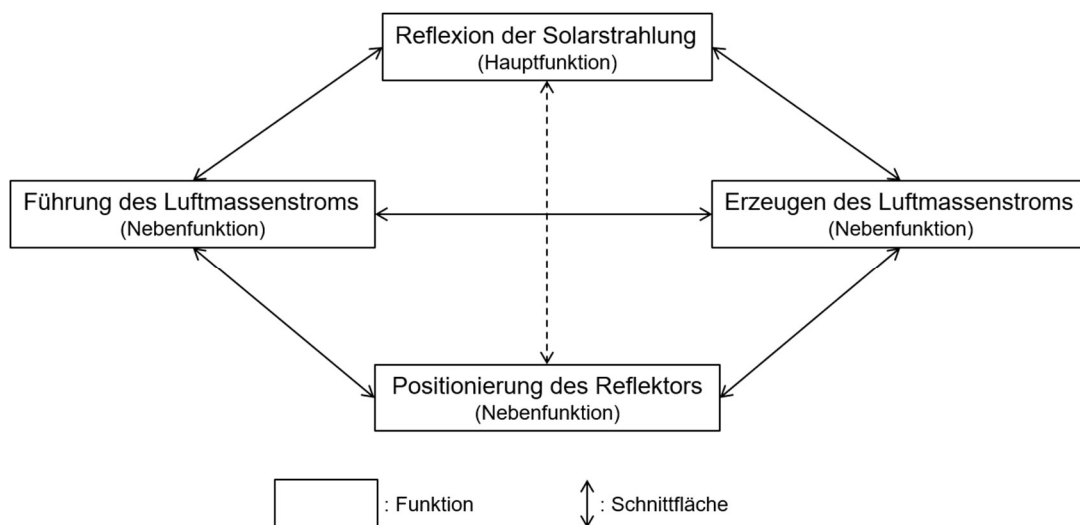


Abbildung 8: Schematische Darstellung der Funktionsstruktur des Sekundärreflektors

Aus jeder der aufgeführten Funktionen resultiert eine Baugruppe für die weitere Bearbeitung. Die Baugruppen sind wie folgt benannt:

- Reflexionsfläche → Reflexion der Solarstrahlung
- Kanalkontur → Führung des Luftmassenstroms
- Lüfter → Erzeugen des Luftmassenstroms
- Tragende Struktur → Positionierung des Reflektors

4.2. Konstruktive Schwerpunkte

Durch eine genauere Betrachtung der Sekundärreflektoren konnten konstruktive Schwerpunkte identifiziert werden. Diese stellen konstruktiv eine Herausforderung dar und müssen deshalb genauer betrachtet werden. Im Folgenden sind alle Schwerpunkte den Baugruppen zugeordnet und aufgelistet.

Reflexionsfläche:

- Geometrie der Segmente
- Maßnahmen für eine günstigere Temperaturverteilung
- Lagerung der Segmente
- Kontaktstellen zwischen den Segmenten – radial
- Kontaktstellen zwischen den Segmenten – tangential

Kanalkontur:

- Schnittfläche zur Reflexionsfläche
- Gestaltung der Kanalkontur
- Kontaktstellen zwischen den Kanalsegmenten – tangential
- Kontaktstellen zwischen den Kanalsegmenten – radial
- Lagerung der einzelnen Kanalsegmente

Lüfter:

- Schnittfläche zur Reflexionsfläche
- Schnittfläche zur Kanalkontur
- Ausrichtung der Ansaugung
- Anbringung des Lüfters
- Anpassen der Querschnittsfläche und der Strömungsrichtung
- Lagerung des Lüfters

Tragende Struktur:

- Schnittfläche zur Reflexionsfläche
- Schnittfläche zur Kanalkontur
- Schnittfläche zum Lüfter
- Tragende Konstruktion

Zu den aufgelisteten Schwerpunkten der Reflexionsfläche wurden mehrere Einzelkonzepte entwickelt. Bei der Konzeptfindung sind zusätzlich zum einfachen Brainstorming weitere Methoden angewandt worden. Es wurden die Konzepte ähnlicher Systeme und Produkte sowie mehrere Konstruktionskataloge (Roth 2001) betrachtet. Dadurch konnten mehr und vielfältigere Konzeptideen generiert werden.

Anschließend wurden die Konzepte anhand der Merkmale in der Anforderungsliste bewertet. Dadurch konnten ungeeignete oder in der Konstruktion zu aufwendige Konzepte aussortiert werden. Alle vielversprechenden Konzepte der Reflexionsfläche wurden intensiver betrachtet und ihre Umsetzbarkeit wurde miteinander verglichen.

4.3. Anforderungen

Aus den in den vorgelagerten Projekten und Arbeitspaketen gewonnenen Erkenntnissen lassen sich Anforderungen und Wünsche für die Konstruktion des Sekundärreflektors ableiten. Diese wurden in einer Anforderungsliste zusammengetragen. Allerdings konzentrieren sich diese Merkmale auf einzelne konkrete Problematiken, sodass damit der Reflektor nicht vollständig betrachtet wird. Die Anforderungsliste wurde deshalb methodisch ergänzt und überprüft.

Durch den Abgleich der Anforderungsliste mit einer Hauptmerkmaliste konnten weitere Merkmale erstellt werden. In der Hauptmerkmaliste sind viele allgemeine Merkmale aufgeführt, die häufig bei der Entwicklung und Konstruktion von Produkten betrachtet werden. Zudem wurde die Szenariotechnik angewandt, um Besonderheiten, die bei unterschiedlichen externen Einflüssen auftreten, zu berücksichtigen. Es wurden deshalb verschiedene Betriebszustände mit dazugehörigen Umwelteinflüssen erarbeitet, denen der Sekundärreflektor ausgesetzt sein kann. Abschließend wurde die Detaillierungsmethode angewandt, um unklar formulierte oder zu allgemeine Merkmale zu konkretisieren (Feldhusen und Grote 2013).

Weitere Anforderungen oder Wünsche sind während der Konzeptauslegung durch Simulationen oder Berechnungen entstanden und wurden nachträglich in die Anforderungsliste eingetragen. Damit dient die Anforderungsliste während des kompletten Konstruktionsprozesses als Grundlage.

Sind Merkmale der Anforderungsliste mit der Priorität „0“ gekennzeichnet, sind dies Festforderungen und müssen in der Konstruktion zwingend umgesetzt werden. Ist die Priorität mit einer Zahl größer null gekennzeichnet, handelt es sich um einen Wunsch. Dabei gilt: Je niedriger die Zahl, desto höher ist die Priorität dieses Wunsches bei der Umsetzung. Die Priorität der Wünsche wurde durch einen paarweisen Vergleich ermittelt.

Zur besseren Übersicht der Anforderungsliste (Tabelle 1) sind Merkmale, die nur für eine Bau-
gruppe relevant sind, gruppiert aufgeführt.

Konstruktion des Sekundärreflektors

Tabelle 1: Anforderungsliste Sekundärreflektor

Unternehmen: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.		Abteilung: Institut für Solarforschung	Projekt: SolSec	Produkt: Sekundärreflektor	Erstellt am: 14.04.2020 Erstellt von: Johannes Clar		Version: 1.0	
Gesamter Reflektor								
ID-Nr.	Merkmal			Einheit	Wert	Priorität	Datum	Quelle
1	Geometrische Vorgaben umsetzen					0	14.04.2020	(Schöttl et al. 2019)
2	Bauraum nur zwischen Turm und Reflektor					0	14.04.2020	Hauptmerkmaliste
3	Identische Reflektoren an den 24 Seiten					0	14.04.2020	Hauptmerkmaliste
4	Thermischen und mechanischen Lasten standhalten					0	14.04.2020	Hauptmerkmaliste
5	Lösbare Verbindungen an den Schnittstellen					0	14.04.2020	Hauptmerkmaliste
6	Keine geschlossenen Flächen an der Unterseite von Kontu- ren (Vermeidung von Wasser- und Schmutzsammelstellen)					0	15.04.2020	Szenariotechnik
7	Robustes Prozessverhalten					2	29.06.2020	Szenariotechnik
8	Termin für virtuellen Gesamtentwurf				31.07.2020	4	15.04.2020	Hauptmerkmaliste
9	Lösbare Verbindungen zwischen einzelnen Bauteilen					5	15.04.2020	Detaillierungsmethode
10	Einfache Montage					8	30.06.2020	Szenariotechnik
11	Mindestanzahl tragender Bauteile				3	11	15.04.2020	Detaillierungsmethode
12	Maximales Gesamtgewicht			t	180	15	14.04.2020	(Schöttl et al. 2019)
13	Positionierungshilfen durch Loslagerungen					16	15.04.2020	Detaillierungsmethode
Reflexionsfläche								
ID-Nr.	Merkmal			Einheit	Wert	Priorität	Datum	Quelle
14	Polierte Stahlbleche als Träger der Beschichtung				1.4301	0	14.04.2020	(Gledhill 2020)
15	Maximale Temperatur der reflektierenden Beschichtung			°C	400	0	14.04.2020	(Gledhill 2020)

Konstruktion des Sekundärreflektors

16	Verwendung einer hochemissiven Beschichtung ϵ_{hoch}	%	95	0	15.04.2020	(Gerkamp 2020)
17	Verwendung einer temperaturstabilen reflektierenden Beschichtung; Reflexionsgrad ρ	%	90	0	16.04.2020	(Gerkamp 2020)
18	Verschiebung radial nach außen zulassen	mm	110	0	03.07.2020	FEM Analyse
19	Verformung senkrecht zur reflektierenden Fläche zulassen	mm	22	0	03.07.2020	FEM Analyse
20	Vorgegebene Fertigungsreihenfolge einhalten			0	14.04.2020	(Gledhill 2020)
21	Ebene Oberfläche einzelner Segmente (keine Schraubenköpfe etc.)			0	14.04.2020	(Gledhill 2020)
22	Materialdicke	mm	1	0	14.04.2020	(Schöttl et al. 2019)
23	Austauschbarkeit der Segmente			0	30.06.2020	Szenariotechnik
24	Segmentbreite		ein Kanal	0	25.06.2020	FEM Analyse
25	Segmentlänge	mm	1000	0	25.06.2020	FEM Analyse
26	Seitenwandhöhe	mm	25	0	25.06.2020	FEM Analyse
27	Fläche vollständig lichtundurchlässig			0	15.04.2020	(Gledhill 2019)
28	Spitz zulaufende Geometrie vermeiden			1	14.04.2020	(Uhlig et al. 2015)
29	Gleichmäßige Gestaltung der Seitenwand über die Segmentlänge			6	29.06.2020	FEM Analyse
30	Laser-Kant-Konstruktion			11	14.04.2020	(Gerkamp 2020)
31	Tägliche Reinigung ermöglichen			14	14.04.2020	(Lahlou et al.)
Kühlung (Kanalkontur und Lüfter)						
ID-Nr.	Merkmal	Einheit	Wert	Priorität	Datum	Quelle
32	Luft als Kühlmedium			0	14.04.2020	(Gledhill 2019)
33	Aktive Kühlung			0	14.04.2020	(Gerkamp 2020)

Konstruktion des Sekundärreflektors

34	Maximale Temperatur des Lüfters und der Struktur	°C	70	0	17.04.2020	Szenariotechnik
35	Rechteckförmiger Kanalquerschnitt			0	14.04.2020	(Gerkamp 2020)
36	Trapezförmige Segmente			0	14.04.2020	(Gerkamp 2020)
37	Kanalbreite/Elementbreite		1/10	0	14.04.2020	(Gerkamp 2020)
38	Material		1.4301	0	14.04.2020	Hauptmerkmaliste
39	Strömungsgeschwindigkeit mindestens	m/s	20	0	14.04.2020	(Gerkamp 2020)
40	Aufnahme thermischer Dehnung der Reflexionsfläche			0	15.04.2020	FEM Analyse
41	Einströmpunkt innen bzw. am Absorber			0	14.04.2020	(Gerkamp 2020)
42	Maximaler Druckverlust im Kanal	Pa	600	3	15.04.2020	(Gerkamp 2020)
43	Vermeidung von Unebenheiten			6	22.04.2020	Detaillierungsmethode
44	Luftmassenstrom erhalten			9	15.04.2020	Detaillierungsmethode
45	Laser-Kant-Konstruktion			11	14.04.2020	(Gerkamp 2020)
46	Axiallüfter pro Kanal		1	13	17.04.2020	(Gerkamp 2020)
Tragende Struktur						
ID-Nr.	Merkmal	Einheit	Wert	Priorität	Datum	Quelle
47	Verwendung von verzinktem Baustahl		S235	0	14.04.2020	(Gerkamp 2020)
48	Schwingungsstabil			0	15.04.2020	Hauptmerkmaliste
49	Maximale Temperatur der tragenden Struktur	°C	150	0	15.04.2020	(Gerkamp 2020)
50	Bauraum nur im Schatten der Solarstrahlung (ausgenommen direkte Einstrahlung)			10	17.04.2020	Hauptmerkmaliste
51	Verwendung handelsüblicher Geometrien			17	14.04.2020	Hauptmerkmaliste

4.4. Analysemethodik

Zur Auswertung der entwickelten Konzepte für die konstruktiven Schwerpunkte sind FEM-Modelle erstellt worden. In diesen Modellen wurden Segmente der Reflexionsfläche einzeln oder paarweise modelliert und mit den maximalen thermischen und mechanischen Randbedingungen beaufschlagt. Im Folgenden sind diese Randbedingungen beschrieben und es wird der Auswertungsvorgang der Modelle vorgestellt.

4.4.1. Randbedingungen

Damit in den thermischen Modellen der Reflexionsfläche alle relevanten Einflüsse berücksichtigt werden, musste die Kanalkontur ebenfalls mit abgebildet werden. Beide Baugruppen sollen aus dem Edelstahl 1.4301 gefertigt werden. Die Eigenschaften des Stahls sind in Anhang A aufgeführt. Abbildung 9 zeigt eine vereinfachte Gestaltungsmöglichkeit eines Segments der Reflexionsfläche zusammen mit der Kanalkontur. Darin sind die Flächen, auf denen Randbedingungen aufgebracht wurden, nummeriert und benannt.

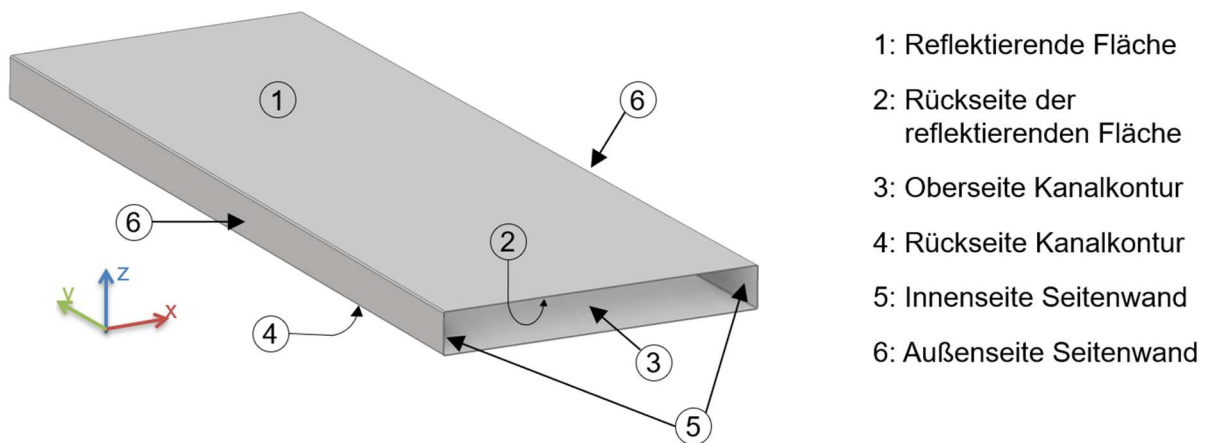


Abbildung 9: Einfache Geometrie der Reflexionsfläche und der Kanalkontur mit nummerierten Flächen

Die konzentrierte Solarstrahlung der Heliostaten trifft auf die reflektierende Fläche. Über die Länge des Segments (Y-Richtung) ändert sich die eintreffende und damit auch die vom Bauteil absorbierte Strahlungsintensität. Aus den Verteilungen der absorbierten Solarstrahlungen über alle Reflektorelemente von (Schöttl 2020) wurden unterschiedliche Belastungsverläufe für die am stärksten bestrahlten Elemente des oberen und des unteren Reflektors erarbeitet (siehe Anhang B). Die in den einzelnen Berechnungen verwendeten Verläufe wurden an die zu berechnenden Kenngrößen angepasst. So wurde bei der Prüfung der Temperaturverteilung der Verlauf „höchste Temperatur“ und bei der Untersuchung der Spannungen der Verlauf „höchster Gradient“ gewählt. Die folgenden Funktionen beschreiben diese beiden Verläufe der absorbierten Intensität I_{abs} in Abhängigkeit zur Position y auf den innersten Segmenten des oberen Reflektors. Die Bezugskante für y ist die innere Kante des Reflektors.

Konstruktion des Sekundärreflektors

- Belastungsverlauf „höchste Temperatur“:

$$I_{\text{abs}}(y) = 29 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2} - 15 \frac{\text{kW}}{\text{m}^3} \cdot |y| \quad \text{für } 0 \text{ m} \leq |y| \leq 1 \text{ m}$$

- Belastungsverlauf „höchster Gradient“:

$$I_{\text{abs}}(y) = 29 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2} - 17 \frac{\text{kW}}{\text{m}^3} \cdot |y| \quad \text{für } 0 \text{ m} \leq |y| \leq 1 \text{ m}$$

Die Kühlung ist wie von (Gerkamp 2020) empfohlen auf die Geometrien aufgetragen worden. Auf der reflektierenden Fläche (Index: Ref) und der Rückseite der Kanalkontur (Index: Rueck) tritt freie Konvektion auf. Im Kanalinneren muss für eine ausreichende Kühlung erzwungene Konvektion stattfinden. Dabei sind die Wärmeübergangskoeffizienten α_i an der beheizten Kanalinnenfläche (Nummer 2; Index: beheizt) und den unbeheizten Kanalinnenflächen (Nummern 3 und 4; Index: unbeheizt) unterschiedlich. Die Außenseiten der Seitenwände liegen direkt an denen benachbarter Segmente, sodass diese vereinfachend als adiabat angenommen werden können. Zur Unterstützung der Kühlung durch Konvektion ist auf den Flächen Nummer 2, 3 und 4 eine hochemissive Beschichtung mit dem Emissionsgrad ϵ_{hoch} vorgesehen. Es reicht aus, in den Simulationen nur die Wärmestrahlung dieser Flächen zu berücksichtigen, da die reflektierende Fläche vernachlässigt werden kann (Gerkamp 2020).

An dem vorgesehenen Standort der Anlage in der Region um Ouarzazate treten Windgeschwindigkeiten bis zu 22 m/s auf. Daraus resultiert ein Staudruck von max. 740 Pa auf den Sekundärreflektor (Gerkamp 2020). Dieser greift ebenfalls auf der reflektierenden Fläche an. In Tabelle 2 sind die Werte für die beschriebenen Randbedingungen aufgeführt.

Tabelle 2: Thermische Randbedingungen der Voruntersuchung

Größe	Wert	Quelle
Umgebungstemperatur ϑ_{amb}	40 °C	(Climate-data.org 2020)
Wärmeübertragungskoeffizient auf der reflektierenden Fläche α_{Ref}	7 W/m ²	(Gerkamp 2020)
Wärmeübertragungskoeffizient beheizte Kanalinnenfläche α_{beheizt}	56,4 W/m ²	(Gerkamp 2020)
Wärmeübertragungskoeffizient unbeheizte Kanalinnenflächen $\alpha_{\text{unbeheizt}}$	43 W/m ²	(Gerkamp 2020)
Wärmeübertragungskoeffizient Kanalrückseite α_{Rueck}	5,5 W/m ²	(Gerkamp 2020)
Emissionsgrad der hochemissiven Beschichtung ϵ_{hoch}	95 %	(Gerkamp 2020)
Emissionsgrad poliertes Edelstahlblech ϵ_{pol}	20 %	(Thermographie Xtra 2020)
Staudruck durch Wind p_{stau}	740 MPa	(Gerkamp 2020)

In den Analysen werden zwei verschiedene Lastfälle betrachtet. Lastfall 1 berücksichtigt nur die thermische Belastung der Sekundärreflektoren. Lastfall 2 berücksichtigt zusätzlich zur thermischen Belastung auch die Windlast. In beiden Lastfällen wird die Masse der Bauteile vernachlässigt.

Konstruktion des Sekundärreflektors

Zur Berechnung der mechanischen Reaktionen der Geometrien bei Belastung sind drei Lagerungsprinzipien entwickelt worden. Die dargestellten Ersatzschaubilder beschreiben dabei die auf die Modelle aufgetragenen Randbedingungen.

Bei Verwendung von Lagerungsprinzip 1 (siehe Abbildung 10) werden die Segmente so gelagert, dass deren innere Kante ihre Position beibehält. Eine Wärmedehnung des Segments in Y- und in Z-Richtung wird dabei zugelassen, wobei eine Krümmung um die X-Achse unterbunden wird. In X-Richtung muss die Wärmedehnung durch Stauchen oder Beulen der Reflexionsfläche aufgenommen werden.

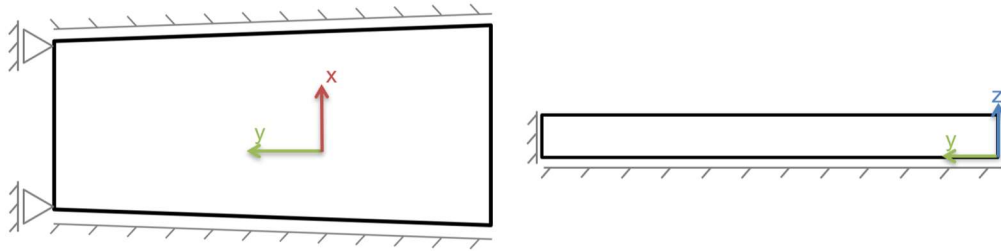


Abbildung 10: Lagerungsprinzip 1

Lagerungsprinzip 2 sieht vor, dass die Wärmedehnungen in Y- und in Z-Richtung zugelassen werden. Allerdings kann auch hier eine Krümmung um die X-Achse nicht stattfinden. Die Wärmedehnung einzelner Segmente in X-Richtung wird bei dieser Lagerung zugelassen, indem sich die Segmente in negative Y-Richtung bewegen (siehe Abbildung 11).

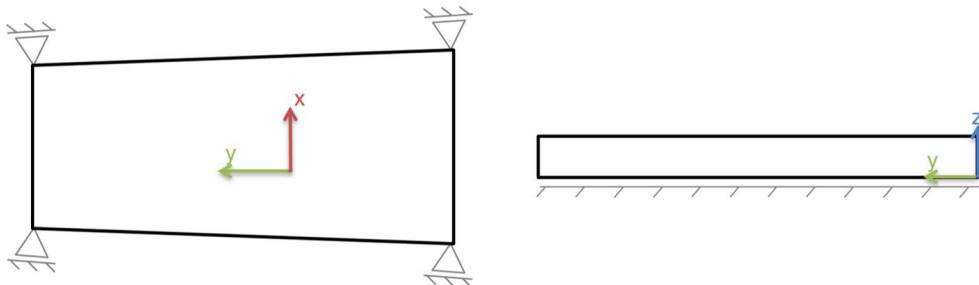


Abbildung 11: Lagerungsprinzip 2

In Lagerungsprinzip 3 sind die Segmente so gelagert, dass die Ausdehnungen in Y- und in Z-Richtung stattfinden können. Eine Krümmung um die X-Achse wird dabei zugelassen. Die Wärmedehnung in X-Richtung wird hier ebenfalls durch eine Segmentbewegung in negative Y-Richtung zugelassen (siehe Abbildung 12).

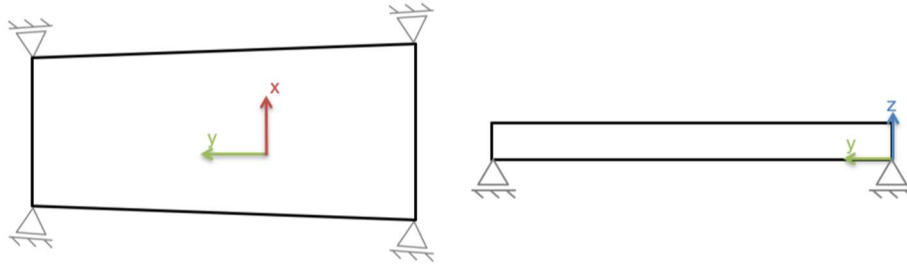


Abbildung 12: Lagerungsprinzip 3

4.4.2. Modellauswertung

Alle erstellten FEM-Modelle sind so aufgebaut worden, dass der netzbedingte Fehler der Analyseergebnisse maximal 3 % beträgt.

Im ersten Schritt der Auswertung wurden die Temperaturverteilungen über die komplette Geometrie der Modelle berechnet. Diese wurden auf lokale Überschreitungen der zulässigen Maximaltemperatur ϑ_{zul} von 400 °C und stark ausgeprägte Temperaturgradienten geprüft.

Daran anschließend wurden die Modelle mechanisch untersucht, das heißt, es wurden die gesamte Verformung, die Verformungsanteile in X-, Y- und Z-Richtung, die Vergleichsspannung nach von Mises und die Normalspannungen in X-, Y- und Z-Richtung berechnet. Bei der Berechnung der Spannungen wurde unabhängig von der Streckgrenze der ideal elastische Fall angenommen. Eventuell auftretende plastische Verformungen wurden dabei nicht berücksichtigt. Die Qualität der Spannungswerte ist somit begrenzt. Es ließen sich dennoch unterschiedliche Lastfälle und Konzepte miteinander vergleichen und Aussagen darüber treffen, ob und an welchen Stellen plastische Verformung auftritt. Qualitativ bessere Ergebnisse hätten sich auch durch die aufwendigere Berücksichtigung der plastischen Verformung nicht ergeben, da die realen Bedingungen dazu nicht ausreichend genau simuliert werden konnten.

Die in den Analysen berechneten Spannungen resultieren fast ausschließlich aus den auftretenden Gradienten der Temperaturverteilungen und sind somit Sekundärspannungen. Diese bauen sich nach einmaliger plastischer Verformung ab. Als Richtwert für die auftretenden Spannungen wurde deshalb die 1 %-Dehngrenze $R_{p1,0}$ festgelegt. Liegen die Spannungen unter dieser Grenze tritt plastische Verformung nicht oder nur in einem vernachlässigbaren Umfang auf. Abbildung 13 stellt die 1 %-Dehngrenze von 1.4301 graphisch in Abhängigkeit von der Temperatur dar.

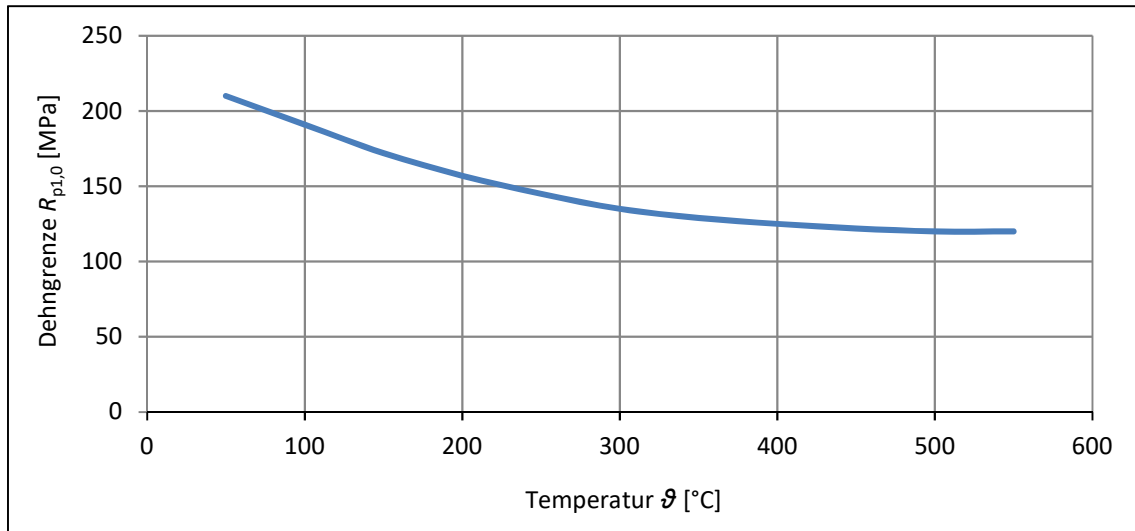


Abbildung 13: 1 %-Dehngrenze von 1.4301 in Abhängigkeit von der Temperatur

Für einen Vergleich der auftretenden Spannungen mit der 1 %-Dehngrenze hat eine reine Betrachtung der Spannungsverteilungen nicht ausgereicht, da die Belastbarkeit von 1.4301 temperaturabhängig und die Temperatur der Reflexionsfläche nicht homogen ist. Somit musste die Geometrie vollständig in Abhängigkeit von der Temperatur geprüft werden.

Deshalb wurde der örtliche Sicherheitsfaktor $S(x,y,z)$ eingeführt. Dieser beschreibt das Verhältnis zwischen der Spannungsverteilung $\sigma(x,y,z)$ und der 1 %-Dehngrenze $\sigma_{zul}(\vartheta)$ wie folgt:

$$S(x, y, z) = \frac{\sigma_{zul}(\vartheta(x, y, z))}{\sigma(x, y, z)}$$

Damit konnten alle Modelle, für die an allen Punkten die Bedingung $S > 1$ erfüllt ist, als geeignet eingestuft werden.

4.5. Auslegung der Segmentgeometrie

Die Reflexionsfläche eines Elements des oberen Reflektors ist etwa 25 m² groß und die eines Elements des unteren etwa 20 m². Eine Gestaltung dieser Flächen aus einem Bauteil ist sowohl aus konstruktiver als auch aus fertigungstechnischer Sicht nicht sinnvoll. Deshalb müssen die Reflexionsflächen der Reflektorelemente in mehrere Segmente unterteilt werden.

4.5.1. Gestaltungsprinzipien der Segmente

Für die Geometrie der Segmente der Reflexionsfläche konnten auf Basis der Anforderungsliste in einem Brainstorming drei Gestaltungsprinzipien erarbeitet werden.

Modell 1.1 beschreibt den Entwurf der Reflexionsfläche, der bereits bei der thermischen Auslegung der Kühlung verwendet wurde (Gerkamp 2020). Dabei wird ein rechteckförmiger Kanal aus Blech gekantet, sodass die Reflexionsfläche und die Kanalkontur in einem Bauteil zusammengefasst sind. Damit besteht die Reflexionsfläche aus Segmenten, die sich in der Breite an die Kanalkontur anpassen und am seitlichen Rand Biegeradien aufweisen. In Abbildung 14 ist Modell 1.1 zeichnerisch dargestellt. Weiterhin werden in dieser Abbildung einige Begriffe zur Orientierung erläutert.

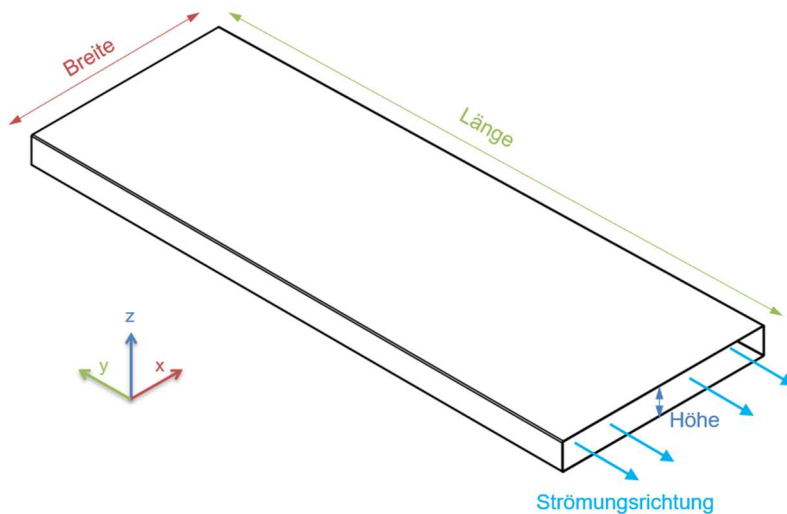


Abbildung 14: Zeichnung von Modell 1.1 mit Orientierungshilfen

In Modell 1.2 ist die Reflexionsfläche von der Kanalkontur getrennt, sodass es möglich ist, die Seitenwand nicht über die komplette Länge des Segments auszubilden. An den Stellen, an denen sich keine Seitenwand befindet, haben die reflektierenden Flächen aneinander liegender Segmente eine einfache Stoßverbindung. Alle weiteren geometrischen Eigenschaften sind identisch mit Modell 1.1. Abbildung 15 zeigt die Geometrie dieses Modells.

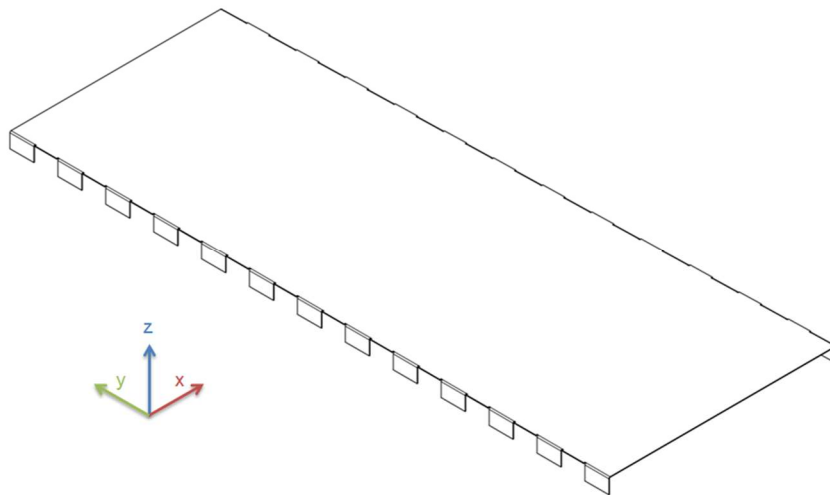


Abbildung 15: Zeichnung von Modell 1.2

Das Modell 1.3 hat die Form eines Sechsecks und erstreckt sich in der Breite über bis zu 3 Kanäle. Damit diese Segmentgeometrie ein trapezförmiges Reflektorelement abbilden kann, müssen die Kantstücke an den Elementaußenkanten eine drei- bzw. viereckige Form haben. An der Rückseite der Reflexionsfläche sind Seitenwände der Kanalkontur geschweißt, um den Luftmassenstrom zu führen. Alternative Verbindungsmöglichkeiten schließt die Anforderungsliste aus. In Abbildung 16 ist die Geometrie des Modells zu sehen.

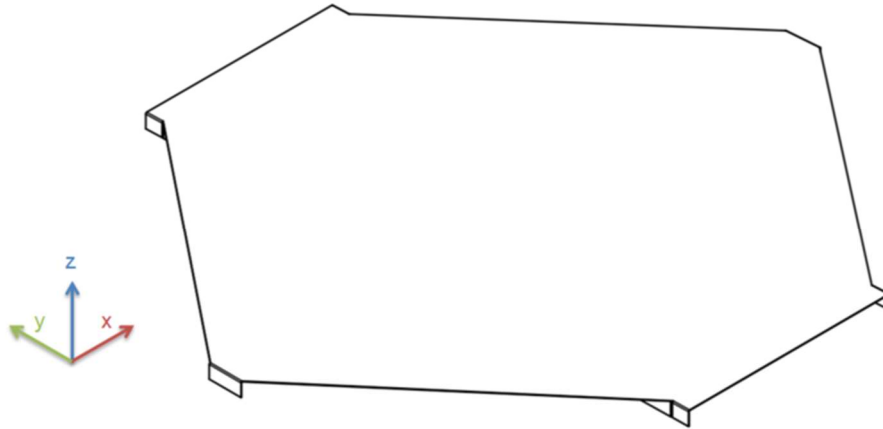


Abbildung 16: Zeichnung von Modell 1.3

Diese Modelle sind in einer numerischen Untersuchung mit den Lastfällen 1 und 2 belastet und mit allen drei Lagerungsprinzipien gelagert worden. Die Auswertung wurde dann wie in Kapitel 4.4 beschrieben durchgeführt.

Diese Analyse hat gezeigt, dass die thermische Belastung zu einer Temperaturdifferenz zwischen der Reflexionsfläche und der Kanalkontur führt (siehe Abbildung 17). Sind diese beiden Baugruppen wie in Modell 1.1 in einem Bauteil zusammengefasst, erzeugen die damit verbundenen unterschiedlichen Wärmedehnungen Spannungen in den Seitenwänden. Diese Spannungen liegen unabhängig vom Lastfall und Lagerungsprinzip großflächig über der 1 %-Dehngrenze. Aus diesem Grund müssen die Wärmedehnungen der Reflexionsfläche und der Kanalkontur unabhängig voneinander stattfinden können.

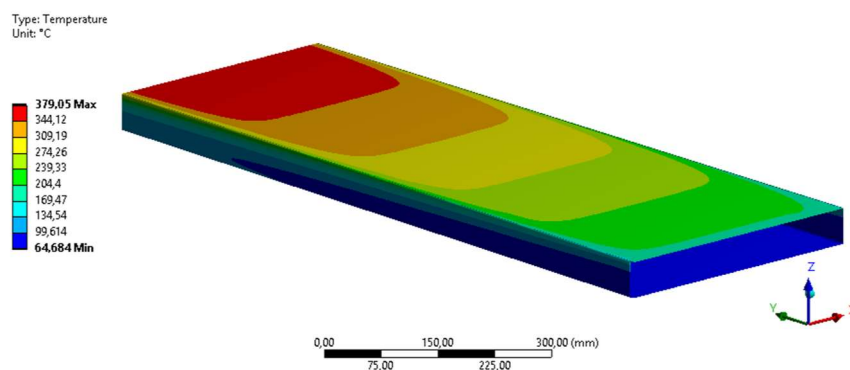


Abbildung 17: Temperaturverteilung von Modell 1.1

Weiterhin hat die Auswertung ergeben, dass bei einer ungleichmäßig gestalteten Seitenwand (siehe Modell 1.2) die Wärme der reflektierenden Fläche unterschiedlich stark in die Seitenwand abgeleitet wird (siehe Abbildung 18). Dadurch entsteht an den seitlichen Kanten der reflektierenden Fläche ein schwankender Temperaturverlauf über die Segmentlänge mit starken lokalen Temperaturgradienten. Die daraus resultierenden Spannungen überschreiten die 1 %-Dehngrenze und sind höher im Vergleich zu einer Geometrie mit gleichmäßig gestalteten Seitenwänden.

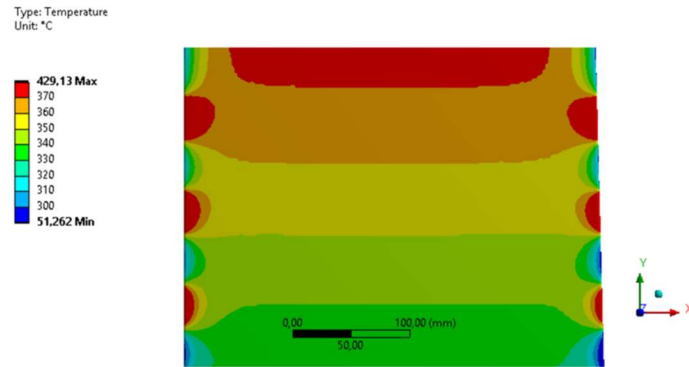


Abbildung 18: Ausschnitt der Temperaturverteilung von Modell 1.2

Erstreckt sich die Reflexionsfläche wie in Modell 1.3 in der Breite über mehrere Kanäle, wird im unmittelbaren Bereich um die angeschweißten mittleren Seitenwände mehr Wärme von der reflektierenden Fläche abgeführt als in der Kanalmitte. Dadurch entsteht ein Temperaturgradient, der Spannungen hervorruft, die über der 1 %-Dehngrenze liegen (siehe Abbildung 19). Die in Kapitel 4.6 beschriebenen Maßnahmen zum Ausgleich von Temperaturgradienten können diesen Gradienten nicht soweit abschwächen, dass die daraus resultierenden Spannungen auf einem akzeptablen Niveau liegen. Eine räumliche Ausweitung dieser Maßnahmen führt zu einer Erhöhung der Temperatur in der Kanalmitte, ohne dass die Temperatur an der mittleren Seitenwand steigt. Die Segmente der Reflexionsfläche sollten sich deshalb in der Breite nur über einen Strömungskanal erstrecken.

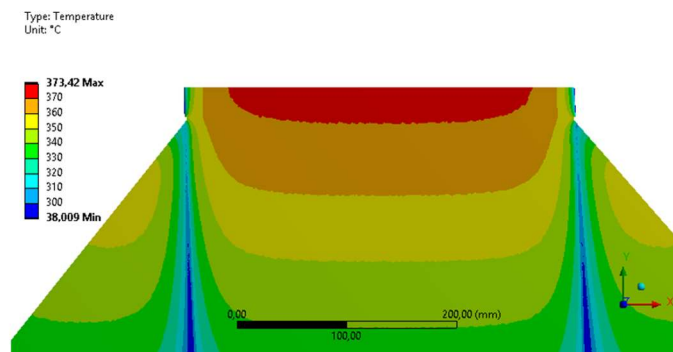


Abbildung 19: Ausschnitt der Temperaturverteilung von Modell 1.3

Aus den gewonnenen Erkenntnissen konnte folgendes Gestaltungsprinzip entwickelt werden: Es sieht die Geometrie von Modell 1.2 mit einer gleichmäßig gestalteten Seitenwand vor. Da sich die Segmente der Reflexionsfläche damit nur über einen Strömungskanal erstrecken, liegen die Maße der Segmentbreite bereits fest. Die Maße für die Segmentlänge und die Seitenwandhöhe sind noch variabel. Abbildung 20 zeigt das erarbeitete Gestaltungsprinzip und stellt die bereits festliegenden Maße an einem Segment aus der innersten Reihe für den oberen und unteren Reflektor dar.

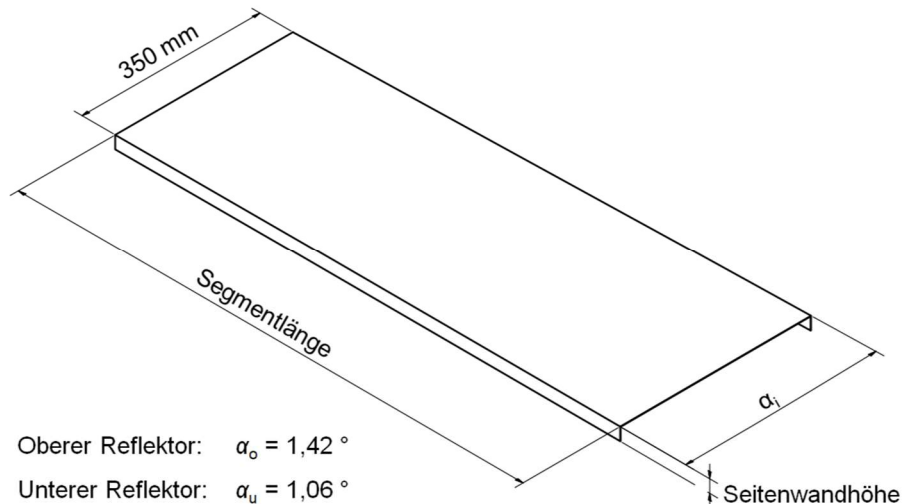


Abbildung 20: Gewähltes Gestaltungsprinzip der Segmente der Reflexionsfläche mit bemaßter Segmentbreite

4.5.2. Bestimmung der optimalen Segmentmaße

Bei der Auslegung der Maße für die Segmentlänge und die Seitenwandhöhe müssen folgende Zusammenhänge berücksichtigt werden. Zum einen ist in Anbetracht der Kontaktstellen zwischen den Segmenten der Reflexionsfläche in Strömungsrichtung (radiale Kontaktstelle) eine hohe Segmentlänge gewünscht. Mit zunehmender Segmentlänge sinken an diesen Stellen die maximale thermische Belastung und damit auch die auf der reflektierenden Fläche auftretenden Spannungen (siehe Kapitel 4.8). Zum anderen wurde das Lagerungsprinzip 3 als geeignete Lagerung für diese Geometrie gewählt (siehe Kapitel 4.7). Unter diesen Randbedingungen steigt mit zunehmender Segmentlänge und abnehmender Seitenwandhöhe die zuzulassende Verformung in die Höhe. Diese muss von der Lagerung an der Seitenwand aufgenommen werden können. Bei sehr großen Verformungen in Z-Richtung lässt sich eine Lagerung aus konstruktiver Sicht nicht mehr integrieren, ohne dass die 1 %-Dehngrenze überschritten wird. Deshalb wurde für das Verhältnis von der Verformung in die Höhe und Seitenwandhöhe ein Grenzwert definiert. Die maximale Verformung der Segmente in Z-Richtung darf nicht größer sein als die Seitenwand hoch ist.

Die grundlegenden Daten für die Auslegung der Segmentmaße wurden durch FEM-Analysen geometrischer Variationen der Segmentgeometrie ermittelt. Darin wurde die Höhe der Seitenwand zwischen 10 mm und 35 mm in 5 mm-Schritten und die Segmentlänge zwischen 400 mm und 1200 mm in 200 mm-Schritt variiert. Dabei mussten beide Lastfälle betrachtet werden. Bei der Anwendung von Lastfall 1 ist die maximale Verformung in Z-Richtung größer und aus Lastfall 2 resultieren höhere Spannungen in der Geometrie.

Aus den Ergebnissen dieser Analysen ergibt sich für jede Segmentlänge eine mindestens benötigte Seitenwandhöhe, damit der Grenzwert für die Verformung in die Höhe eingehalten wird. Die daraus resultierenden möglichen Kombinationen sind in Tabelle 3 aufgeführt.

Tabelle 3: Mögliche Kombinationen aus Segmentlänge und Seitenwandhöhe

Segmentlänge [mm]	Seitenwandhöhe [mm]	Max. Verformung in Z-Richtung [mm]
400	10	6,2
600	15	11,2
800	20	16,4
1000	25	21,4

Weiterhin geht aus der Auswertung der Daten hervor, dass die maximale Vergleichsspannung und der niedrigste Sicherheitsfaktor nur sehr wenig von der Segmentlänge beeinflusst werden. Das Auftreten plastischer Verformung hängt somit fast ausschließlich von der Höhe der Seitenwand ab. In allen Variationen, in denen die Seitenwand nicht höher als 25 mm ausgebildet ist, wird ein Sicherheitsfaktor von 1 nicht unterschritten. Bei längeren Segmenten und damit verbundenen höheren Seitenwänden überschreiten die auftretenden Spannungen die 1 %-Dehngrenze. Somit tritt in keiner der in Tabelle 3 aufgeführten Kombinationen eine plastische Verformung in einem hohen Umfang auf.

Unter Berücksichtigung aller Anforderungen an die Segmentgeometrie wurde eine Segmentlänge von 1000 mm in Kombination mit einer Seitenwandhöhe von 25 mm festgelegt. In Abbildung 21 ist der Sicherheitsfaktor S über diese Geometrie aufgetragen. Darin sind die Maßnahmen zur Unterdrückung der Kühlung an den Seitenwänden wie in Kapitel 4.6 beschrieben und das Lagerungsprinzip 3 ideal berücksichtigt worden. Diese Verteilung des Sicherheitsfaktors zeigt somit die geringsten und damit auch konstruktiv angestrebten Reaktionen der Geometrie bei maximaler Belastung. An den unteren Ecken der Seitenwände sind Singularitäten mit abgebildet, die bei der Auswertung nicht berücksichtigt wurden. Zur besseren Veranschaulichung der Abbildung wurden alle Werte des Sicherheitsfaktors bei $S > 10$ gleich 10 gesetzt. In dieser Abbildung ist zu erkennen, dass auf den Seitenwänden die am stärksten belasteten Bereiche liegen.

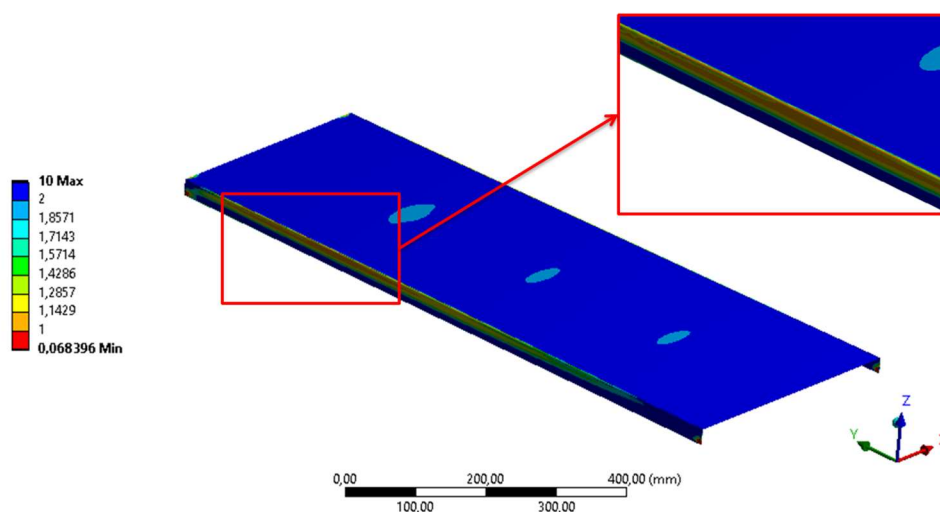


Abbildung 21: Verteilung des Sicherheitsfaktors S über die festgelegte Geometrie

4.6. Maßnahmen für eine günstigere Temperaturverteilung

4.6.1. Erarbeitung von Maßnahmen

Wird ein Segment der Reflexionsfläche aus der innersten Reihe wie in Kapitel 4.5 ausgelegt und nur mit den gegebenen Randbedingungen aus Kapitel 4.4 beaufschlagt, sind die mechanischen Reaktionen der Geometrie durch die thermische Belastung bei allen drei Lagerungsprinzipien so groß, dass an den Seitenwänden die 1 %-Dehngrenze deutlich überschritten wird. Eine Ursache für die auftretenden Spannungen ist die Temperaturdifferenz über die Breite der Reflexionsfläche. Diese entsteht an den Übergangsbereichen zwischen der reflektierenden Fläche und den Seitenwänden. Dort wird die Wärmeabgabe der reflektierenden Fläche durch eine Wärmeleitung in die Seitenwand verstärkt und ist damit größer als die Wärmeabgabe in der Kanalmitte.

Bei der Belastung der Geometrie mit dem Belastungsverlauf „höchste Temperatur“ sinkt die Temperatur zur seitlichen Außenkante des Segments hin innerhalb von 70 mm um bis zu 110 °C. Ausgeglichen werden kann dies durch eine verminderte Kühlung im umliegenden Bereich der Seitenwand. Geeignete Maßnahmen zur Verminderung der Kühlung sind eine vollständige Unterdrückung der Konvektion und eine Reduktion des Emissionsgrades auf $\varepsilon_{\text{pol}} = 0,2$ durch Polieren des Bleches. Werden diese Maßnahmen ideal in einem 7,5 mm breiten Bereich direkt an einer Seitenwand umgesetzt, reduziert sich die Temperaturdifferenz, ohne dass die Temperatur in der Kanalmitte steigt. Die Temperatur sinkt innerhalb von 15 mm nur noch um 50 °C. Durch diese Maßnahmen konnte die maximale Vergleichsspannung in der erarbeiteten Segmentgeometrie bei Verwendung des Lagerungsprinzips 3 von etwa 280 MPa auf etwa 140 MPa reduziert werden. In beiden Fällen tritt die maximale Vergleichsspannung in der Seitenwand auf.

In Abbildung 22 ist der Temperaturverlauf ohne (links) und mit den getroffenen Maßnahmen (rechts) dargestellt.

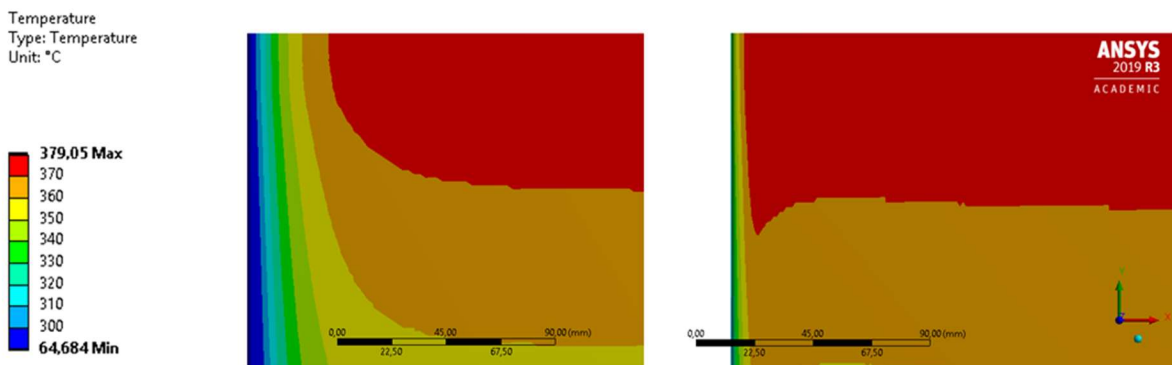


Abbildung 22: Vergleich der seitlichen Temperaturgradienten ohne (links) und mit Konvektionsunterdrückung (rechts)

4.6.2. Konstruktive Umsetzung der Konvektionsunterdrückung

Für die konstruktive Umsetzung der benötigten Konvektionsunterdrückung sind zwei Konzepte entwickelt worden, die alle Merkmale der Anforderungsliste ausreichend erfüllen. In Konzept RUK 1 unterbindet ein zusätzlich angebrachtes Ausgleichsblech die Konvektion. Alternativ dazu ist in Konzept RUK 2 die Seitenwand durch einen Falz nach innen versetzt. In dem sich

Konstruktion des Sekundärreflektors

dadurch bildenden Spalt zwischen benachbarten Segmenten ist eine Isolierung vorgesehen, um eine Konvektion zu unterdrücken. Abbildung 23 stellt den Aufbau beider Konzepte dar.

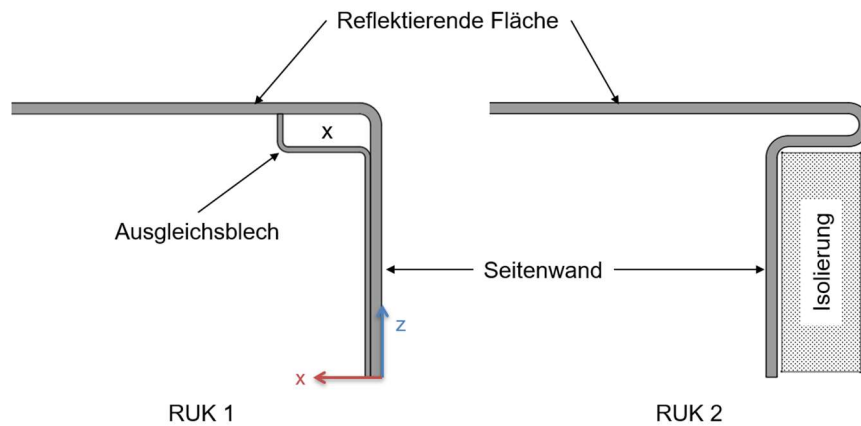


Abbildung 23: Konzepte zur Unterdrückung der Konvektion

Durch das zusätzliche Blech lässt sich der konvektionsunterdrückte Bereich leichter variieren. Dies ist besonders für die Prüfung dieser Maßnahme im Prototyp unter realen Bedingungen ein Vorteil, da so schnell und kostengünstig Korrekturen vorgenommen werden können. Hinzu kommt, dass normale Druckkräfte zwischen den Seitenwänden benachbarter Segmente bei einem Einsatz von Konzept RUK 2 zusammen mit dem gewählten Lagerungsprinzip 3 (siehe Kapitel 4.7) ungewollte Überlappungen von Segmenten hervorrufen können. Aus diesen Gründen wurde Konzept RUK 1 für die Unterdrückung der Konvektion gewählt.

Bei der Auslegung von Konzept RUK 1 in einer numerischen Berechnung mussten die durch das Ausgleichsblech entstehenden Effekte berücksichtigt werden. Als Werkstoff des Ausgleichsblechs wurde der Edelstahl 1.4301 mit einer unbehandelten Oberfläche gewählt. Damit liegt zwischen dem Ausgleichsblech und der Seitenwand ein Kontakt von Edelstahlfächen vor. Die daraus resultierenden zusätzlich benötigten Randbedingungen sind in Tabelle 4 aufgeführt.

Tabelle 4: Zusätzliche Randbedingungen bei Konzept RUK 1

Größe	Wert	Quelle
Emissionsgrad unbehandelte Edelstahloberflächen $\epsilon_{\text{unbehandelt}}$	0,3	(Thermographie Xtra 2020)
Minimaler thermischer Kontaktwiderstand zwischen Edelstahlfächen $R'_{\text{th},1}$	$2,5 \cdot 10^{-4} \text{ (m}^2\text{K)/W}$	Anhang D
Maximaler thermischer Kontaktwiderstand zwischen Edelstahlfächen $R'_{\text{th},2}$	$5 \cdot 10^{-3} \text{ (m}^2\text{K)/W}$	Anhang D

Da die Hohlräume zwischen Ausgleichsblech und Reflexionsfläche (in Abbildung 23 mit „x“ markiert) mit Luft gefüllt sind, findet dort freie Konvektion statt. Zur Reduktion dieser müssen die Hohlräume an den Enden geschlossen werden. Eine Abschätzung der Rayleigh-Zahl und der Nusselt-Zahl nach (Dropkin und Somerscales 1965) ergab, dass in diesem Fall die freie Konvektion im oberen und im unteren Reflektor für $\bar{L} < 5 \text{ mm}$ vernachlässigbar gering ist. Dabei ist \bar{L} der mittlere Abstand zwischen der Rückseite der Reflexionsfläche und dem Ausgleichsblech (siehe Abbildung 25). Im weiteren Verlauf der Auslegung wurde deshalb in diesen

Konstruktion des Sekundärreflektors

Hohlräumen ruhende Luft ($Nu = 1$) angenommen. Für den dort herrschenden Wärmeübergang α gilt damit:

$$\alpha = \frac{\lambda_{\text{Wärme}}}{\bar{L}}$$

Um wie gewünscht einen geringen Wärmeübergang im Hohlraum zu erhalten, musste \bar{L} so groß wie möglich gewählt werden. Aus konstruktiver Sicht ist jedoch ein kleiner Abstand \bar{L} erstrebenswert, da so mehr Bauraum für die weiteren Baugruppen bleibt. Der Abstand \bar{L} musste deshalb zusammen mit der Breite des Hohlraums b (siehe Abbildung 25) an die vorliegenden Bedingungen angepasst werden. Dazu wurden in der numerischen Analyse der Abstand \bar{L} zwischen 2 mm und 5 mm und die Breite b zwischen 6 mm und 10 mm variiert.

Für die Bestimmung der optimalen Maße des Ausgleichsblechs sind die in der Analyse entstandenen Temperaturverteilungen mit der Temperaturverteilung bei idealer Konvektionsunterdrückung verglichen worden. Es zeigte sich, dass sich die ideale Konvektionsunterdrückung mit einer Breite $b = 9,5$ mm und einem Abstand \bar{L} von ca. 3 mm des Ausgleichsblechs erreichen lässt. Der thermische Kontaktwiderstand zwischen dem Ausgleichsblech und der Seitenwand hat dabei nur einen geringen Einfluss, sodass auf seine genaue Auslegung verzichtet werden konnte. In Abbildung 24 sind die theoretischen Temperaturverläufe ohne und mit idealer Konvektionsunterdrückung sowie die Temperaturverläufe von Konzept RUK 1 mit minimalem und maximalem thermischen Kontaktwiderstand über den Abstand x von der Seitenwand aufgetragen.

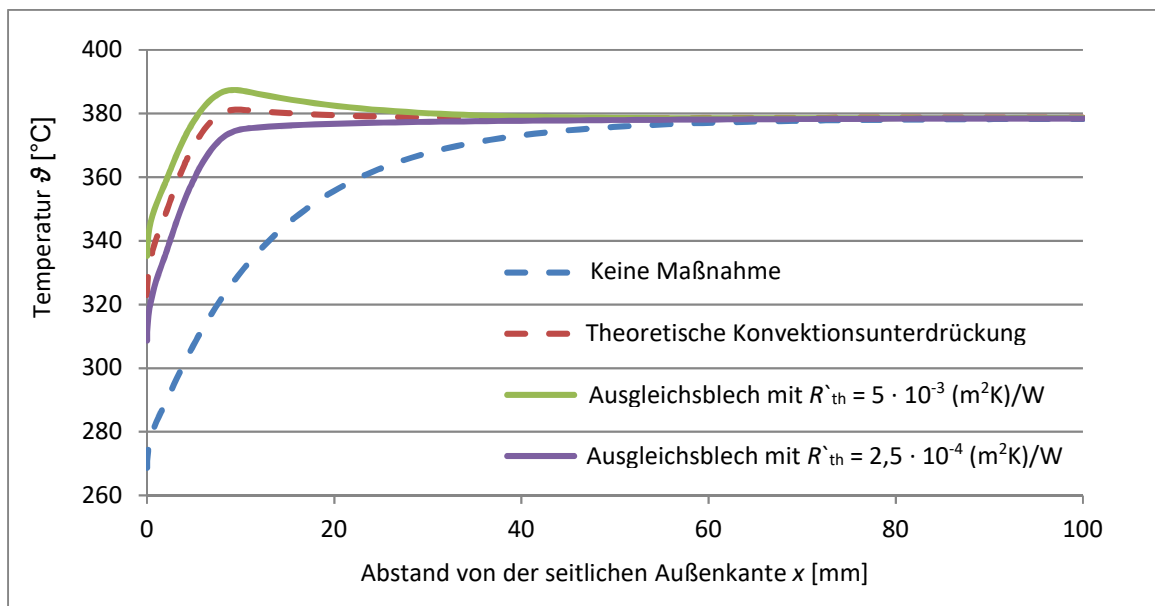


Abbildung 24: Temperaturverlauf über die Segmentbreite bei einer absorbierten Strahlungsintensität von 29 kW/m^2

Das Profil des Ausgleichsblechs, das sich über die komplette Länge des Segments erstreckt, ist in Abbildung 25 dargestellt. Zur Befestigung des Ausgleichsblechs am Segment der Reflektionsfläche eignen sich an der Innenseite der Seitenwand angeschweißte Gewindebolzen. Damit ist das Ausgleichsblech über eine lösbare Verbindung mit dem Segment verbunden und kann leicht ausgetauscht werden.

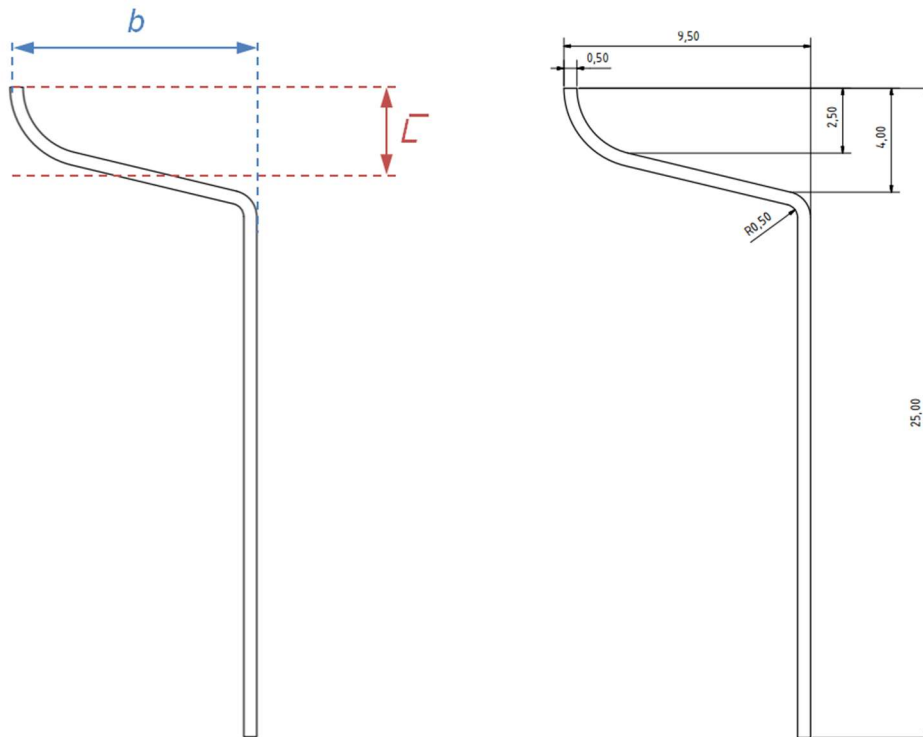


Abbildung 25: Zeichnungen der optimalen Geometrie des Ausgleichsblechs bemaßt

4.7. Lagerung der Segmente

Bei maximaler thermischer Belastung entstehen Temperaturgradienten in der Reflexionsfläche, die im Bauteil Spannungen hervorrufen. An den Seitenwänden liegt der minimale Sicherheitsfaktor auch mit den getroffenen Maßnahmen für eine günstigere Temperaturverteilung und bei freier Ausdehnung (spannungslose Lagerung) lokal etwa bei 1,1. Die Lagerung musste deshalb so gestaltet werden, dass die Spannungen im kritischen Bereich nur gering verstärkt werden.

4.7.1. Auswahl des Lagerungsprinzips

Durch jede mechanische Unterdrückung der Wärmedehnung verstärken sich die Spannungen in der belasteten Geometrie. Deshalb wurde die Lagerung der Modelle so gewählt, dass sich das Bauteil möglichst ungehindert ausdehnen kann. Dies wird erreicht, wenn die im Folgenden beschriebenen Bewegungen zugelassen werden.

Um die Reflexionsfläche über die Breite lichtundurchlässig zu gestalten, müssen die Seitenwände der Segmente Kontakt zueinander haben. Eine direkte Ausdehnung der Segmente in die Breite wird damit verhindert. Jedoch wird eine Ausdehnung in die Breite durch eine Verschiebung des Segments in Strömungsrichtung möglich. Zusätzlich dazu sind die Ausdehnungen des Segments in Strömungsrichtung und in die Höhe zu berücksichtigen. Hinzu kommt, dass sich die Geometrie durch den Temperaturgradienten über die Höhe der Seitenwand um die X-Achse krümmt.

Da das Lagerungsprinzip 3 alle diese Bewegungen zulässt, wurde die Lagerung nach diesem Prinzip gestaltet. Allerdings wurde diese Lagerung um frei verschiebbare Lagerungspunkte

ergänzt. Diese dienen als Führung und sollen die Krümmung des Segments um die X-Achse am Überschreiten des Maximalwertes hindern. Abbildung 26 stellt das überarbeitete Lagerungsprinzip dar und führt eine Bezeichnung der Lagerungspunkte ein. Das Verhalten eines Segments bei der Anwendung dieses Lagerungsprinzips ist in Anhang C beschrieben.

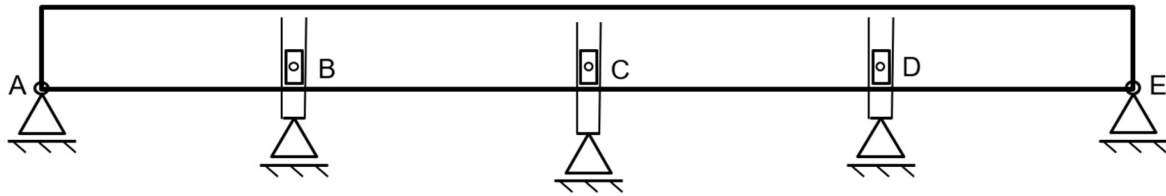


Abbildung 26: Funktionsprinzip der gewählten Lagerung

4.7.2. Konstruktive Umsetzung der Lagerung

Die entwickelte Lagerung sieht vor, dass den Segmenten die folgenden Bewegungen ermöglicht werden:

- Rotation um die Normale der Seitenwände an den Lagerungspunkten
- Bewegung in Strömungsrichtung
- Bewegung in die Höhe

Diesen Bewegungen ließen sich unabhängig voneinander konstruktive Lösungen zuordnen.

Die Rotation um die Lagerungspunkte lässt sich in der Praxis am einfachsten durch Schraub- oder Bolzenverbindungen realisieren. Diese bieten den Vorteil, dass sie vielfältig einsetzbar sind und sich flexibel in Systeme integrieren lassen. Hierzu wurden keine alternativen Lösungen gefunden.

Da sowohl die Bewegung in Strömungsrichtung als auch die Bewegung in die Höhe eine Translation der Lagerungspunkte erzeugen, sind die Umsetzungsmöglichkeiten beider Bewegungen identisch. Durch die folgenden Lösungen lassen sich diese Bewegungen realisieren:

- Führung in einem Langloch
- Führung durch formschlüssige Geometrien (z.B. Falz)
- Führung durch eine Kombination aus Schlitten und Schiene
- Führung über ein Gestänge bzw. Hebelsystem
- Verbindung über ein geometrisch verformbares Zwischenstück

Aus unterschiedlichen Kombinationen dieser konstruktiven Lösungen ließen sich Konzepte entwickeln. Dabei benötigen einige Konzepte für ihre Umsetzung einen Lagerungsadapter zwischen der Reflexionsfläche und der Kanalkontur (Konzept RL1 bis RL 4). Andere Konzepte ermöglichen eine direkte Verbindung zwischen der Kanalkontur und der Seitenwand (Konzept RL 5 und RL 6). Eine Zuordnung der konstruktiven Lösungen zu den Konzepten ist in Tabelle 5 zu finden.

Konstruktion des Sekundärreflektors

Tabelle 5: Erläuterung der Lagerungskonzepte

Konzepte	Bewegungen		
	Rotation um Lagerungspunkte	Translation in Strömungsrichtung	Translation in die Höhe
RL 1	Schraubverbindung	Langloch in Adapter	Langloch in Adapter
RL 2	Schraubverbindung	Langloch in Kanalkontur	Langloch in Adapter
RL 3	Bolzenverbindung	Langloch in Kanalkontur	Rotation des Adapters
RL 4	Schraubverbindung	Schiene und Schlitten an Kanalkontur	Langloch in Schlitten
RL 5	Schraubverbindung	Langloch in Kanalkontur	Langloch in Seitenwand
RL 6	Schraubverbindung	Ein Langloch in der Kanalkontur für beide Translationen	

Alle 6 erarbeiteten Konzepte wurden anhand der Kriterien in der Anforderungsliste miteinander verglichen. Ohne eine Ausarbeitung mit anschließender numerischer Analyse aller Konzepte lassen sich keine vergleichenden Aussagen über die Auswirkungen auf die Temperatur- und Spannungsverteilung treffen. Hiervon wurde jedoch aufgrund des damit verbundenen Aufwands abgesehen. Der Vergleich beschränkt sich deshalb auf die Kriterien, die nach einer einfachen konstruktiven Gestaltung abgeschätzt werden konnten. In Tabelle 6 ist die Bewertung der Konzepte detailliert dargestellt.

Tabelle 6: Bewertung der Lagerungskonzepte anhand aller relevanten Kriterien der Anforderungsliste

Legende der Bewertung: 10: erfüllt das Kriterium ohne zusätzlichen Aufwand 5: Kriterium kann mit akzeptablem Aufwand erfüllt werden 1: Kriterium kann nur mit sehr großem Aufwand erfüllt werden 0: Kriterium kann nicht erfüllt werden	Lösbare Verbindungen an den Schnittstellen	Robustes Prozessverhalten	Einfache Montage	Maximales Gesamtgewicht m_{ges}	Gleichmäßige Gestaltung der Seitenwand über die Segmentlänge	Maximaler Druckverlust im Kanal	Mittelwert der Bewertung
Konzept RL1	7	6	7	7	8	7	7
Konzept RL2	7	6	7	7	8	7	7
Konzept RL3	7	5	7	7	8	7	6,8
Konzept RL4	8	7	6	7	8	6	7
Konzept RL5	8	9	9	8	7	8	8,2
Konzept RL6	8	6	9	8	8	8	7,8

Es wurde deutlich, dass eine direkte Verbindung von Seitenwand und Kanalkontur aus konstruktiver Sicht für diesen Einsatz besser geeignet ist als eine Verbindung über

Lagerungsadapter. Zwar lässt sich durch Lagerungsadapter die geforderte Bewegungsfreiheit leichter erreichen. Jedoch ist der Aufwand, den Verformungsprozess robust zu gestalten, bei der Verwendung von Lagerungsadaptern größer. Weiterhin verringert sich durch die Lagerungsadapter die Breite des durchströmbaren Querschnitts, wodurch das Erreichen des gewünschten Druckverlusts erschwert wird. Von einer intensiveren Betrachtung der Konzepte RL 1 bis RL 4 wurde deshalb abgesehen.

Das Konzept RL 6 kombiniert beide translativen Bewegungen in einem Langloch, sodass diese nur in der Kanalkontur ausgebildet werden müssen. Allerdings müssen für die optimale Auslegung dieser Langlöcher die Höhenkomponente und die Komponente in Strömungsrichtung der Bewegung bei unterschiedlichen Belastungen bekannt sein. Eine falsch vorgegebene Bewegung der Lagerungspunkte würde die auftretenden Spannungen verstärken, sodass die Gefahr besteht, dass an den Seitenwänden die 1 %-Dehngrenze überschritten wird. Die Ergebnisse der Simulationen sind dafür nicht ausreichend genau, da diese auf theoretischen Annahmen und Vereinfachungen beruhen und bisher noch nicht praktisch bestätigt oder korrigiert werden konnten. Im Hinblick auf die Gestaltung des Prototyps sind freie Bewegungen der Seitenwand besonders wichtig, da das Versuchsergebnis ansonsten stark negativ beeinflusst werden könnte. Konzept RL5 ermöglicht diese unabhängig voneinander stattfindenden Bewegungen. Deshalb wurde das Lagerungskonzept RL 5 als das beste für diesen Einsatz betrachtet. Dabei ist zu beachten, dass dieses Konzept nur umgesetzt werden kann, wenn benachbarte Segmente an aneinander liegenden Seitenwänden dieselben Schrauben als Lagerungspunkte haben. Abbildung 27 zeigt eine einfache konstruktive Umsetzung von RL 5.

Konzept RL 5:

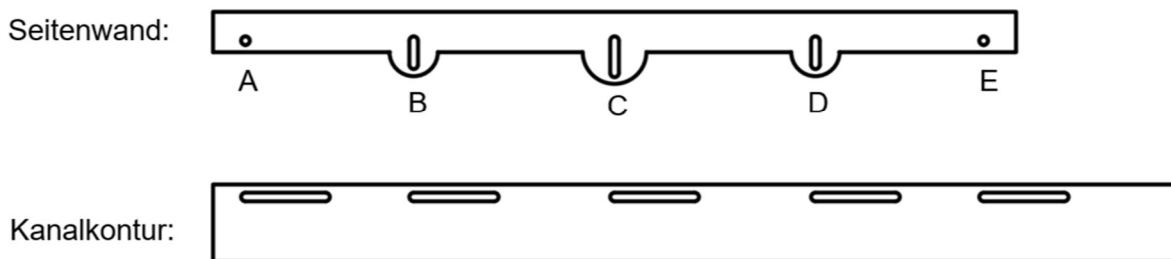


Abbildung 27: Konstruktive Umsetzung des Lagerungskonzepts RL 5

In einer numerischen Analyse dieser Lagerung wurde deren Eignung geprüft. Dazu wurde das geometrische Modell eines Segments der Reflexionsfläche aus der innersten Reihe um Laschen und Langlöcher für die Lagerungspunkte B bis D ergänzt (siehe Abbildung 27). Die Außenseiten der ebenfalls modellierten Kanalkontur liegen an der Innenseite der Seitenwände der Reflexionsfläche an. Es wurden mehrere Berechnungen durchgeführt, in denen der zwischen diesen Flächen angenommene thermische Kontaktwiderstand zwischen $2,5 \cdot 10^{-4} \text{ (m}^2\text{K)/W}$ und $5 \cdot 10^{-3} \text{ (m}^2\text{K)/W}$ variiert wurde (siehe Anhang D). Die Maßnahmen für eine günstigere Temperaturverteilung wurden ideal angenommen. Alle weiteren Randbedingungen wurden wie in Kapitel 4.4 beschrieben auf das Modell aufgetragen.

Diese Prüfung hat gezeigt, dass die auf der reflektierenden Fläche auftretenden Vergleichsspannungen mit dieser Lagerung deutlich unter der Belastungsgrenze liegen. Die Spannungen im oberen Bereich der Seitenwand sind vom thermischen Kontaktwiderstand abhängig. Die 1 %-Dehngrenze wird dabei aber nicht überschritten. An der unteren Kante der Seitenwand wird die 1 %-Dehngrenze überschritten, sodass dort plastische Verformung auftritt. Diese

Konstruktion des Sekundärreflektors

plastische Verformung kann einmalig oder bei jedem Erhitzungszyklus der Reflexionsfläche auftreten. Es besteht deshalb die Gefahr, dass es mit zunehmender Anzahl an Erhitzungszyklen zu einer Ermüdung des Materials in diesem Bereich kommt. Eine genaue Aussage über die Auswirkungen der Verformung auf die Funktion des Bauteils kann erst nach einer praktischen Prüfung des Prototyps getroffen werden. Abbildung 28 zeigt die Verteilung des Sicherheitsfaktors über die Reflexionsfläche.

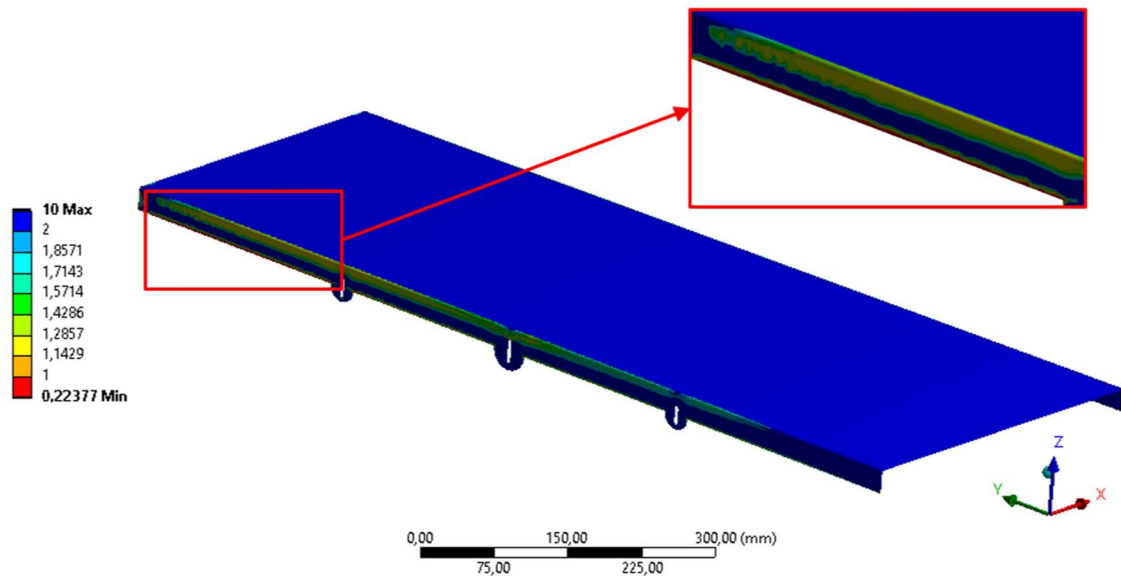


Abbildung 28: Sicherheitsfaktor des innersten Segments mit entwickelter Lagerung

Für die genaue Auslegung der Lagerung müssen die Langlöcher an die maximale Bewegung der Lagerungspunkte bei Verformung der Reflexionsfläche angepasst werden. Eine Betrachtung der Verformung zeigt, dass die maximale Bewegung in die Höhe bei diesem Lagerungskonzept etwa 20 mm beträgt. Der thermische Kontaktwiderstand hat darauf nur einen geringen Einfluss, der vernachlässigt werden kann. Abbildung 29 zeigt diese Durchbiegung in die Höhe über die Längenkoordinate y eines Segments bei einem Kontaktwiderstand von $R_{th} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ (m}^2\text{K)/W}$.

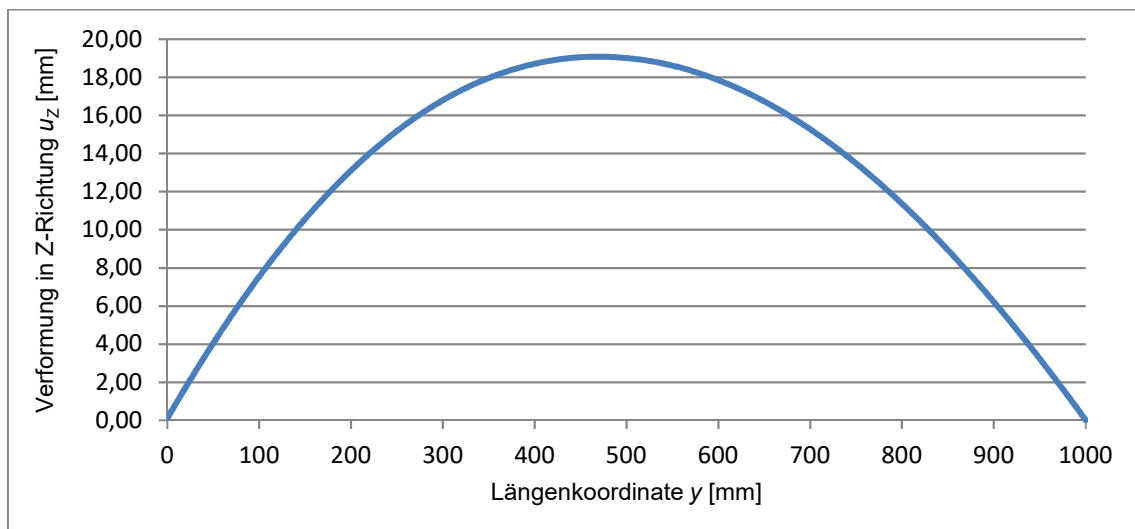


Abbildung 29: Durchbiegung in Z-Richtung über der Längenkoordinate bei $R_{th} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ (m}^2\text{K)/W}$

In Y-Richtung beträgt die maximale Bewegung der Lagerungspunkte etwa 106 mm (siehe Abbildung 30; Kapitel 4.8).

4.8. Kontaktstelle zwischen den Segmenten – radial

Zur Aufnahme der Wärmedehnung sieht die Lagerung eine Bewegung der Segmente in Strömungsrichtung vor. Dabei gilt, dass je höher die Temperatur des Segments ist, desto größer ist die Auslenkung dieser Bewegung. Durch die abnehmende Strahlungsintensität mit zunehmendem Abstand vom Absorber ist die Ausdehnung der inneren Segmente größer als die der äußeren. Damit ist eine formschlüssige Verbindung der Segmente in radialer Richtung nicht möglich. Um die Reflexionsfläche an dieser Stelle dennoch lichtundurchlässig zu gestalten, müssen sich die Segmente überlappen können. Diese Überlappung muss für die maximale Verschiebungsdifferenz aneinander liegender Segmente eines Strömungskanals ausgelegt werden, sodass sich die Segmente in jedem Betriebszustand frei ausdehnen können. Diese maximale Verschiebungsdifferenz tritt an der innersten radialen Kontaktstelle auf, wenn der Belastungsunterschied zwischen dem ersten (bzw. innersten) und dem zweiten Segment eines Strömungskanals maximal ist.

Zur Ermittlung der maximalen Verschiebungsdifferenz wurden deshalb je ein numerisches Modell des ersten und des zweiten Segments erstellt. Das erste Segment wurde mit dem Belastungsverlauf „höchste Temperatur“ und das zweite mit dem Verlauf „niedrigste Temperatur“ des oberen Reflektors belastet. Die Maßnahmen für eine günstigere Temperaturverteilung sind ideal angenommen worden. Alle weiteren Randbedingungen der Modelle sind wie in Kapitel 4.4 beschrieben.

Diese Simulationen haben ergeben, dass sich das erste Segment durch die Wärmedehnung an der Kontaktstelle um bis zu 106 mm und das zweite nur um etwa 50 mm verschiebt. Damit muss eine Überlappung von mindestens 56 mm stattfinden können. Abbildung 30 zeigt die Verschiebung beider Segmente in Y-Richtung.

Erstes Segment:



Zweites Segment:

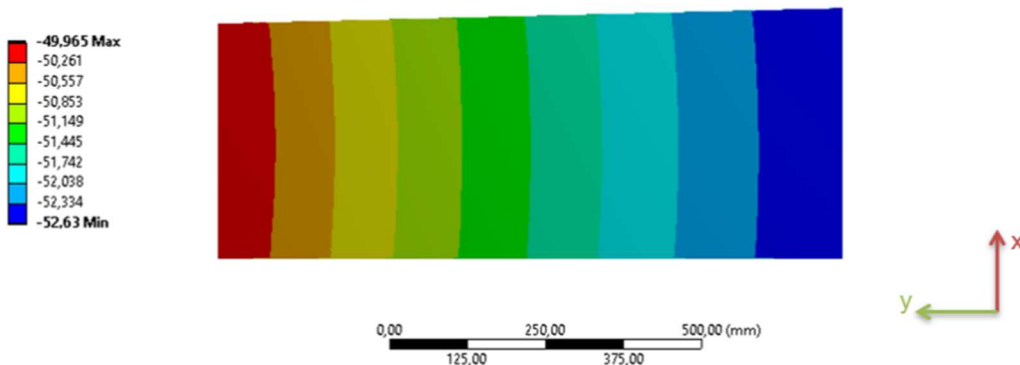


Abbildung 30: Verschiebungen in Y-Richtung der innersten beiden Segmente in Strömungsrichtung bei maximalem Temperaturunterschied

Konstruktiv kann diese Überlappung auf zwei unterschiedliche Weisen umgesetzt werden. In Konzept RRK 1 schiebt sich der Überlappungssteg (in Abbildung 31 grün gekennzeichnet) des inneren Segments (a) vor das äußere Segment (b). Alternativ schiebt sich das innere Segment (a) in Konzept RRK 2 hinter den Überlappungssteg des äußeren Segments (b). Abbildung 31 stellt beide Konzepte schematisch dar. Zudem sind die Reaktionen der Solarstrahlung (gelb) und des Luftmassenstroms (blau) auf die Überlappung eingetragen.

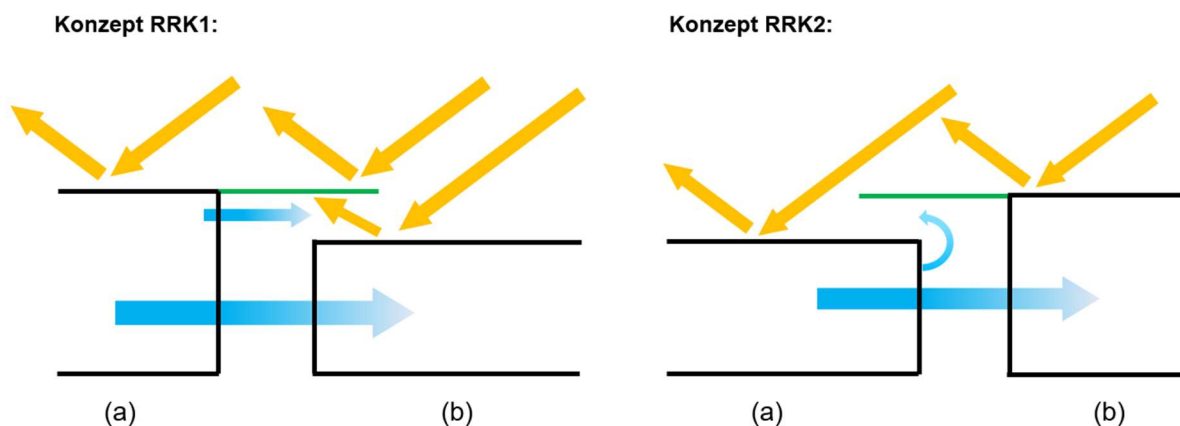


Abbildung 31: Schematische Darstellung der Konzepte der radialen Kontaktstelle

In beiden Konzepten sind die thermischen Bedingungen des Überlappungsstegs anders als die der restlichen reflektierenden Fläche. Die reflektierende Beschichtung des hinteren Segments verringert die Differenz zwischen emittierter und absorbierter Wärmestrahlung des

vorderen Segments. Hinzu kommt, dass unmittelbar an der Überlappung Strahlung vom hinteren Segment mit einem Reflexionsgrad von bis zu 90 % reflektiert wird und anschließend auf die hochemissiv beschichtete Rückseite ($\varepsilon = 95 \%$) des vorderen Segments treffen kann. Bei Konzept RRK 1 geschieht dies durch die konzentrierte Solarstrahlung der Heliostaten und bei Konzept RRK 2 durch die emittierte Wärmestrahlung des Absorbers. Außerdem strömt aufgrund des Druckunterschieds zwischen dem Kanalinneren und der Atmosphäre ein Teil des Luftmassenstroms durch den Überlappungsspalt nach außen, sodass im Überlappungsspalt erzwungene Konvektion auftritt.

Um das Verhalten beider Konzepte miteinander zu vergleichen, wurden die maximalen thermischen Bedingungen abgeschätzt. Dabei wurde nur die innerste radiale Kontaktstelle betrachtet, da diese am stärksten belastet wird.

Die eintreffende Strahlungsintensität vom Absorber auf die innerste Kontaktstelle ergibt sich aus den Daten der thermohydraulischen Analyse von (Schöttl 2020). Diese Daten liefern auch eine Temperaturverteilung der Absorberoberfläche, die für die Abschätzung der vom Absorber emittierten Wärmestrahlung auf die innerste Kontaktstelle benötigt wurde (siehe Anhang E). Für die Berechnung dieser Strahlungsintensität wurde der folgende Zusammenhang verwendet:

$$\dot{Q} = \varphi \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot T^4$$

Dabei ist φ der Sichtfaktor vom Absorber auf die innerste Kontaktstelle. Dieser ergibt sich aus der Geometrie des Receivers und der Sekundärreflektoren. Zudem wurde der Wärmeübergangskoeffizient im Überlappungsspalt berechnet (siehe Anhang F). In Tabelle 7 sind die ermittelten Kenngrößen aufgeführt.

Tabelle 7: Kennwerte der Überlappungskonzepte an der innersten radialen Kontaktstelle

Größe	Wert	Quelle
Strahlungsintensität vom Absorber (unterer Reflektor)	9,6 kW/m ²	
Strahlungsintensität vom Absorber (oberer Reflektor)	13 kW/m ²	
Strahlungsintensität von den Heliostaten (unterer Reflektor)	140 kW/m ²	(Schöttl 2020)
Strahlungsintensität von den Heliostaten (oberer Reflektor)	93 kW/m ²	(Schöttl 2020)
Wärmeübergangskoeffizient im Überlappungsspalt (Konzept RRK 1)	100 – 110 W/(m ² K)	Anhang F
Wärmeübergangskoeffizient im Überlappungsspalt (Konzept RRK 2)	50 – 60 W/(m ² K)	Anhang F

Der Vergleich der Kenngrößen beider Konzepte zeigt, dass zwar die Kühlung durch erzwungene Konvektion im Überlappungsspalt von Konzept RRK 1 größer im Vergleich zu Konzept RRK 2 ist. Jedoch ist die emittierte Wärmestrahlung des Absorbers im Vergleich zur konzentrierten Solarstrahlung deutlich geringer, sodass in Konzept RRK 2 weniger Strahlung auf die hochemissive beschichtete Rückseite des Überlappungsstegs trifft. Eine Abschätzung dieser absorbierten Strahlungsintensität für Konzept RRK 2 hat ergeben, dass diese fast vollständig durch die emittierte Wärmestrahlung der Überlappungsstegrückseite in die Umgebung

ausgeglichen wird und damit vernachlässigbar gering ist. Zusätzlich dazu ist der Verlust des Luftmassenstroms durch den ersten Überlappungsspalt in Konzept RRK 2 nur etwa halb so groß wie in Konzept RRK 1 (siehe Anhang F). Somit werden die nachfolgenden Segmente besser gekühlt.

Aus diesen Gründen wurde in einer numerischen Analyse die Eignung von Konzept RRK 2 geprüft. Dazu ist ein Ausschnitt eines Strömungskanals modelliert worden, der die innersten beiden radialen Kontaktstellen bei vollständiger Überlappung abbildet.

Zusätzlich zu den in Kapitel 4.4 beschriebenen Randbedingungen und den Maßnahmen für eine günstigere Temperaturverteilung wurde hier ein Wärmeübergangskoeffizient α_{1s} von $54 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ an den Oberflächen im ersten Überlappungsspalt bei einer Lufttemperatur ϑ_{1s} von 60 °C eingetragen. Am zweiten Überlappungsspalt sind die Werte $\alpha_{2s} = 43 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ und $\vartheta_{2s} = 80 \text{ °C}$ eingetragen worden. Auch der Strahlungsaustausch zwischen der hochemissiven Beschichtung ($\varepsilon = 0,95$) des vorderen Segments und der reflektierenden Beschichtung des hinteren Segments ($\rho = 0,9$) wurde berücksichtigt. Die daraus resultierenden Temperaturverteilungen der beiden Segmente werden in Abbildung 32 gezeigt. Unterstützend dazu ist eine schematische Seitenansicht der Segmente mit abgebildet.

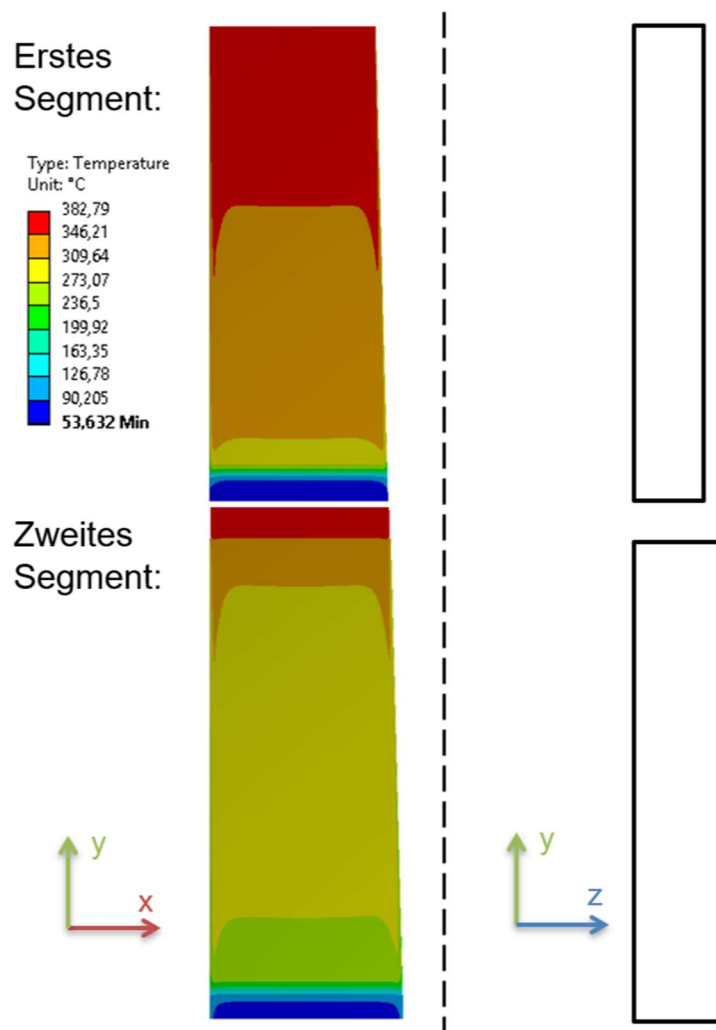


Abbildung 32: Temperaturverteilungen der innersten beiden Segmente bei Überlappung mit prinzipieller Seitendarstellung

Es ist zu erkennen, dass der Teil, der im Schatten des Überlappungsstegs liegt, deutlich weniger erwärmt wird als die restliche reflektierende Fläche. Der Überlappungssteg erwärmt sich hingegen stärker als die restliche reflektierende Fläche. Am zweiten Segment wird so eine Maximaltemperatur von etwa 385 °C erreicht. Damit liegen die maximalen Temperaturen der innersten beiden Segmente auf einem ähnlichen Niveau. Aus thermischer Sicht ist Konzept RRK 2 für den Einsatz im Sekundärreflektor geeignet.

Problematisch ist, dass sich die entstehenden Temperaturgradienten lokal stark auf die Bereiche vor bzw. nach der Überlappung konzentrieren. Unmittelbar um diese Bereiche treten deshalb hohe Vergleichsspannungen auf (siehe Abbildung 33). Diese bestehen zum großen Teil aus Normalspannungen in X-Richtung. Am Überlappungssteg liegen die maximalen Zug- und Druckspannungen bei etwa 70 MPa (Abbildung 33 links) und damit unter der 1 %-Dehngrenze. Mit einer Vergleichsspannung von bis zu 230 MPa ist die Belastung am Strömungsausgang der Segmente (Abbildung 33 rechts) so groß, dass plastische Verformung auftritt.

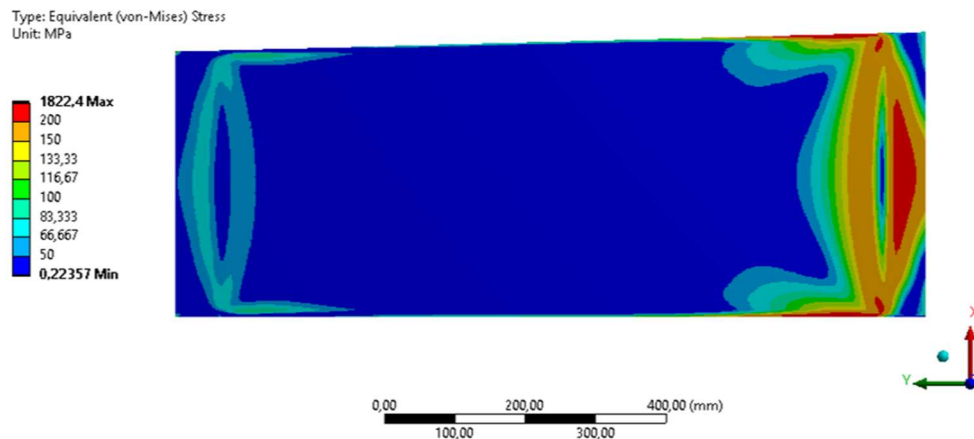


Abbildung 33: Vergleichsspannungen des zweiten Segments bei Überlappung

Eine Möglichkeit zur Spannungsreduktion ist der Abbau des Temperaturgradienten durch eine Erhöhung der Temperatur des hinteren Segments im relevanten Bereich. Hiervon wird jedoch abgesehen, da dadurch auch die Temperatur des davor liegenden Überlappungsstegs steigt, was zu einer Überschreitung der zulässigen Maximaltemperatur von 400 °C führen kann. Es konnten keine geeigneten Maßnahmen zur Reduktion dieser Spannungen gefunden werden.

Die Segmente lassen sich auch nicht durch die Anwendung eines anderen Konzepts entlasten, da die hohen Spannungen durch die in beiden Konzepten vorgesehene Überlappung entstehen. Somit lässt sich eine plastische Verformung der reflektierenden Fläche in diesem Fall nicht vermeiden. Eine genaue Aussage über die tatsächlichen Auswirkungen dieser Spannungen kann nicht getroffen werden. Dazu sind zum einen die Ergebnisse der numerischen Berechnungen mit einer zu großen Unsicherheit behaftet, da die berechneten Randbedingungen auf vielen Annahmen und Vereinfachungen beruhen. Zum anderen ist nicht bekannt, ob die reflektierende Beschichtung den Dehnungen standhält. Eine genauere Betrachtung dieser Stelle würde einen hohen numerischen Aufwand bedeuten. Allerdings wäre auch die Aussagekraft dieser Ergebnisse begrenzt.

Das Verhalten der radialen Kontaktstelle sollte deshalb zusätzlich zu dieser numerischen Betrachtung unter realen Bedingungen geprüft werden. Dazu ist eine Abbildung der innersten radialen Kontaktstelle im Prototyp notwendig.

4.9. Kontaktstelle zwischen den Segmenten – tangential

Im unbelasteten Zustand liegen die Biegeradien benachbarter Segmente über die komplette Segmentlänge direkt aneinander. Unter Belastung ändert sich dies. Die Temperatur der Reflexionsfläche und damit auch die Wärmedehnung nehmen mit zunehmendem Abstand vom Absorber ab. Dadurch können sich die Seitenwände zur Mitte des Strömungskanals hin biegen, sodass sich zwischen den Biegeradien ein Spalt bildet. Dabei nimmt die Breite dieses Spalts mit abnehmender Temperatur der reflektierenden Fläche zu. Abbildung 34 zeigt die Temperaturverteilung eines der innersten Segmente des oberen Reflektors mit dem Lastverlauf „höchster Gradient“ (links) und die daraus resultierende Verformung in X-Richtung (rechts) mit dem Lagerungsprinzip 3.

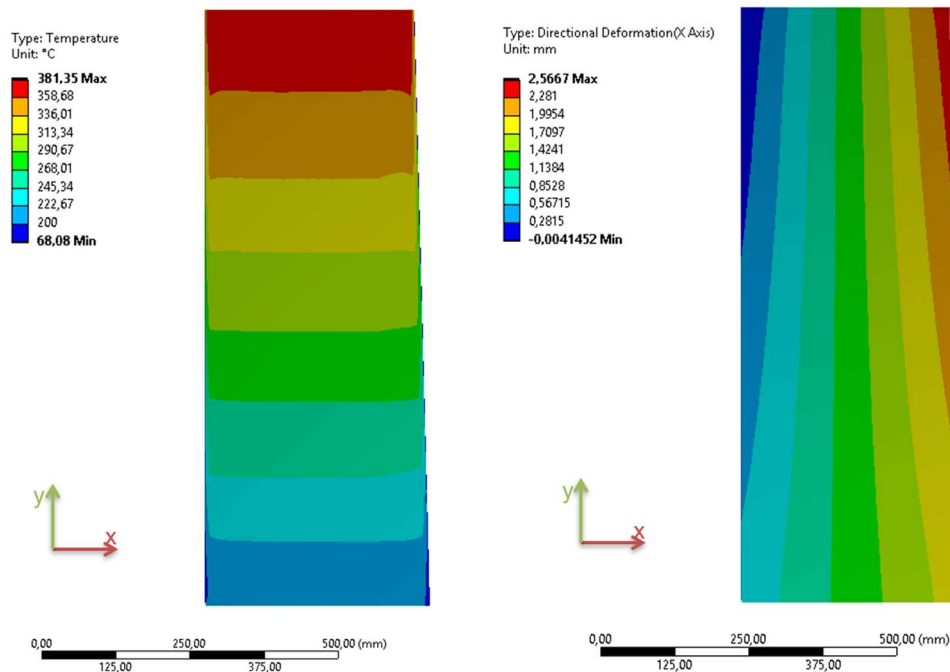


Abbildung 34: Temperaturverteilung auf der reflektierenden Fläche (links);
Verformung der reflektierenden Fläche in X-Richtung (rechts)

Verstärkt wird diese Spaltbildung durch die Windlast. Die reflektierende Fläche wird dadurch lichtdurchlässig und die konzentrierte Solarstrahlung kann auf nicht für eine Reflexion ausgegerichtete Oberflächen treffen.

Eine mechanische Verbindung aneinander liegender Seitenwände direkt an der reflektierenden Fläche kann eine Spaltbildung verhindern. Die unterschiedlichen Wärmedehnungen in X-Richtung über die Segmentlänge werden dabei durch eine mechanische Verformung der reflektierenden Fläche ausgeglichen. Im kälteren Teil der reflektierenden Fläche tritt dann eine Zugbelastung auf und im heißeren Teil eine Druckbelastung. Der auszugleichende Wärmeausdehnungsunterschied ist bei maximaler thermischer Belastung allerdings so groß, dass die mechanischen Reaktionen die 1 %-Dehngrenze großflächig überschreiten. Es konnten keine geeigneten konstruktiven Maßnahmen zur Entlastung gefunden werden. An der tangentialen Kontaktstelle zwischen Segmenten müssen sich deshalb Spalte ausbilden können.

Auf die thermische Belastung des Spalts nehmen viele Faktoren Einfluss. Dazu gehören unter anderem die Breite und die Tiefe des sich bildenden Spalts, die Kontur der gebogenen Seitenwand und im Spalt auftretende freie Konvektion. Die Bestimmung dieser Faktoren ist entweder

mit einem sehr hohen Rechenaufwand verbunden oder mit einer großen Unsicherheit behaftet, sodass in einem angemessenen Zeitraum in einer numerischen Untersuchung kein aussagekräftiges Ergebnis hätte erzielt werden können.

Um die Spaltbildung der tangentialen Kontaktstellen auf geeignete Weise zu überprüfen, muss diese im Prototyp abgebildet und unter realen Bedingungen eingesetzt werden.

4.10. Gesamtentwurf der Reflexionsfläche

Aus der Zusammenfassung aller erarbeiteten Konzepte ergab sich ein Gesamtentwurf der Reflexionsfläche. Die Gestalt dieses Gesamtentwurfs wird im folgenden Abschnitt vorgestellt und erläutert.

Die geforderte Gestalt der Reflektorelemente wird erreicht, indem über die Breite eines Elements 10 Segmente und in der Länge 5 (beim unteren Reflektor) bzw. 6 (beim oberen Reflektor) aneinander angeordnet sind. Dabei haben alle Segmente eine Länge von 1000 mm. Die Segmentbreite und die Winkel der Seitenwand ergeben sich aus der Position des Segments auf dem Reflektorelement. Damit ist die Geometrie aller Segmente unterschiedlich. Abbildung 35 zeigt die Einteilung der Elemente des oberen und des unteren Reflektors in Segmente.

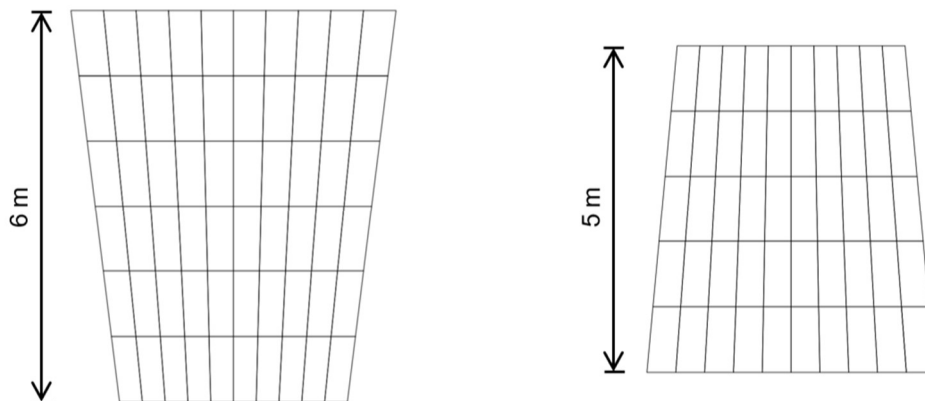


Abbildung 35: Einteilung der Reflektorelemente in Segmente;
links: oberer Reflektor; rechts: unterer Reflektor

An den einzelnen Segmenten müssen je zwei Ausgleichsbleche an den Innenseiten der Seitenwände angebracht werden (siehe Kapitel 4.6). Zur Befestigung des Ausgleichsblechs am Segment der Reflexionsfläche sind an der Innenseite der Seitenwände angeschweißte Gewindebolzen vorgesehen. In Abbildung 36 ist das Ausgleichsblech (rot) und dessen Anbringung mit den angeschweißten Gewindebolzen (grün) dargestellt.

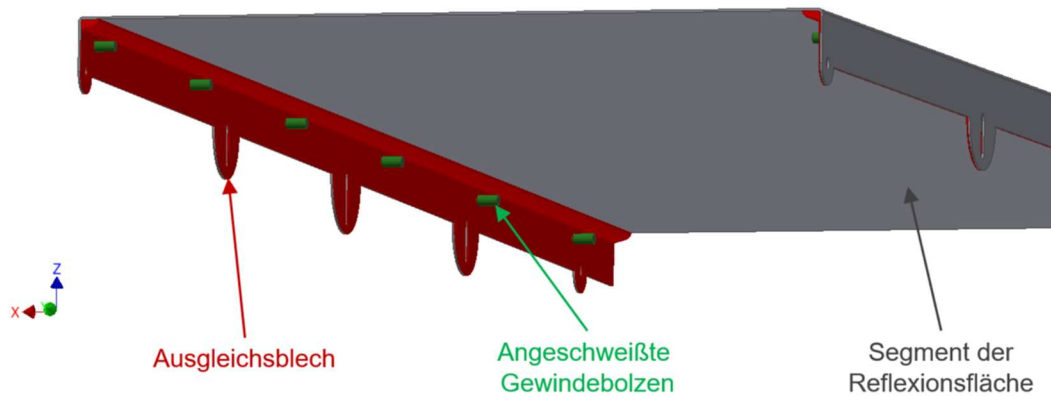


Abbildung 36: Einbauposition des Ausgleichsblechs

Im gewählten Lagerungskonzept kann sich das Segment in Strömungsrichtung bewegen. Dazu sind in den Seitenwänden der Kanalkontur Langlöcher vorgesehen, in denen die Lagerungspunkte des Segments gleiten können. In diese Richtung bewegen sich beispielsweise die Segmente aus der ersten Reihe eines Elements des oberen Reflektors um bis zu 106 mm und die aus der zweiten Reihe um bis zu 60 mm. Dementsprechend müssen die Langlöcher in der Kanalkontur ausgelegt werden. Um die Krümmung des Segments in die Höhe um bis zu 20 mm zuzulassen, sind an den mittleren Lagerungspunkten Langlöcher in der Seitenwand der Reflexionsfläche vorgesehen.

Die Lagerungspunkte sind am unteren Ende der Seitenwand der Reflexionsfläche angeordnet, da das Ausgleichsblech und dessen Anbringung den Bauraum im oberen Bereich der Seitenwand benötigen. Für die konstruktive Umsetzung der Lagerung in den Segmenten der Reflexionsfläche sind deshalb Laschen notwendig. Abbildung 37 zeigt diese konstruktive Umsetzung. Darin sind die Reflexionsfläche und die Kanalkontur in Z-Richtung auseinandergezogen.

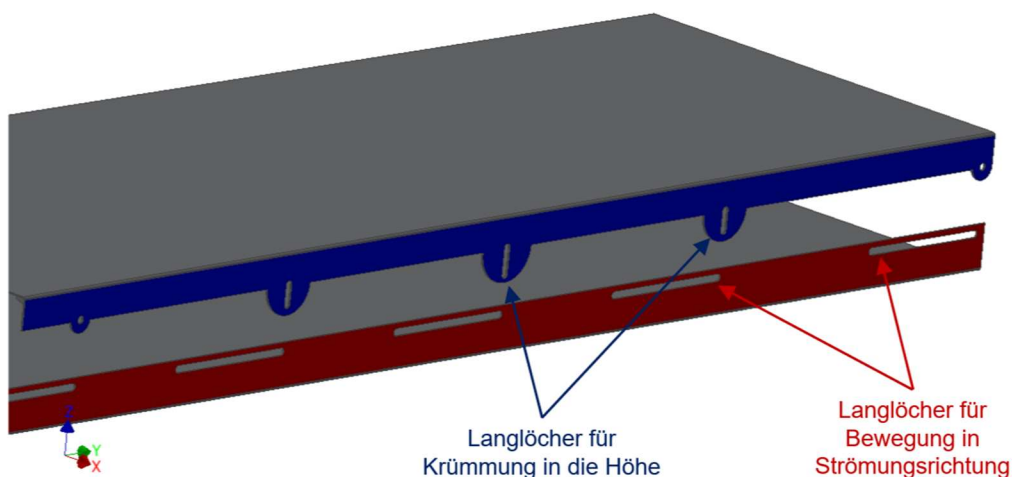


Abbildung 37: Konstruktive Umsetzung der Lagerung

Damit sich die Segmente wie gefordert an ihrer radialen Kontaktstelle überlappen können, dürfen im Überlappungsbereich des vorderen Segments (am Überlappungssteg) keine Seitenwände in voller Höhe ausgebildet sein. Aus Stabilitätsgründen sollte auf die Seitenwände am

Konstruktion des Sekundärreflektors

Überlappungsspalt jedoch nicht komplett verzichtet werden. Es besteht zudem die Gefahr, dass sich durch die Krümmung der Segmente der Überlappungsspalt schließt. Um dies zu verhindern, sollte der Überlappungsspalt bei nicht gekrümmten Segmenten mindestens 7 mm hoch sein. Unter diesen Bedingungen kann am Überlappungsspalt eine Seitenwand mit einer Höhe von 3 mm ausgebildet werden. In Abbildung 38 ist diese Überlappung mit den empfohlenen Maßen abgebildet.

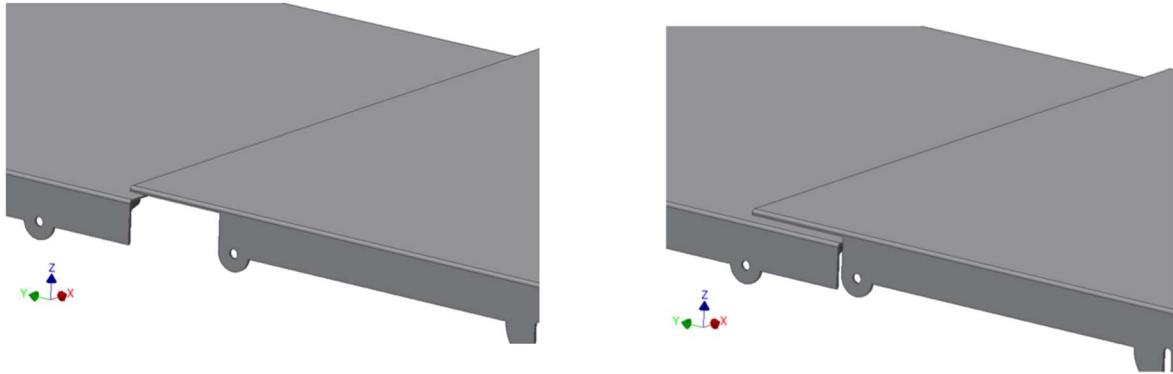


Abbildung 38: Radiale Kontaktstelle nicht überlappend (links) und überlappend (rechts)

Abbildung 39 zeigt den vollständigen Gesamtentwurf der Reflexionsfläche zusammen mit einer vereinfachten Kanalkontur. Um in der Abbildung die einzelnen Konzepte sichtbar darzustellen, wurde darauf verzichtet, ein Reflektorelement vollständig abzubilden.

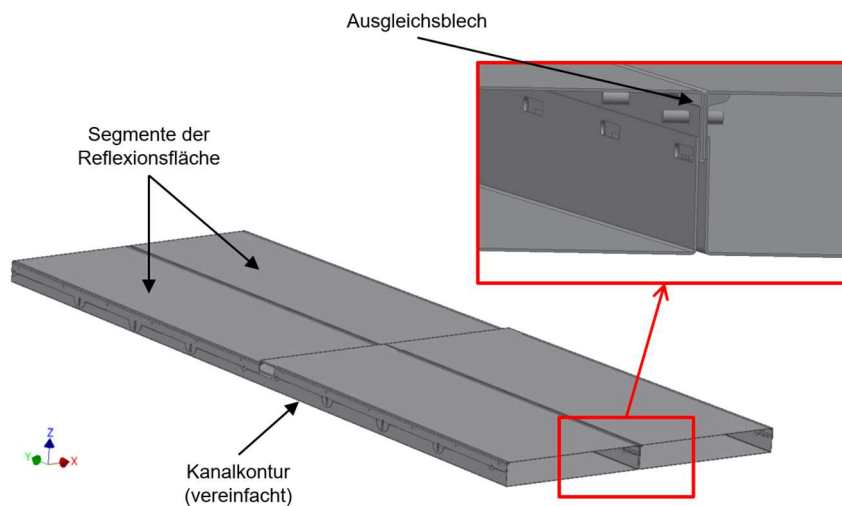


Abbildung 39: Gesamtentwurf der Reflexionsfläche mit vereinfachter Kanalkontur

5. Konstruktionsempfehlungen für den Prototyp

Mit dem Prototyp soll die Umsetzbarkeit der Sekundärreflektoren unter realen Bedingungen geprüft werden. Auf Basis der bisherigen Erkenntnisse können Empfehlungen für die Konstruktion des Prototyps gegeben werden, damit das Ergebnis dieser Prüfung aussagekräftig ist.

5.1. Empfehlungen zur Gestalt

Der Prototyp ist so zu gestalten, dass er das Verhalten der Sekundärreflektoren unter Belastung widerspiegelt. Dies ist stark von den Maßen der einzelnen Segmente abhängig. Die Segmente sollten deshalb in Originalgröße abgebildet werden. Hinzu kommt, dass die reflektierende Fläche im Prototyp nur etwa 1 m² groß sein soll, sodass seine Gestalt nur auf wenige Segmente begrenzt ist. Anhand dieser Segmente sollten die hoch belasteten Stellen der Reflexionsfläche geprüft werden können. Zu diesen gehören die innersten Segmente eines Elements des oberen Reflektors, da diese der stärksten Belastung durch die konzentrierte Solarstrahlung ausgesetzt sind. Eine weitere hoch belastete Stelle ist die innerste radiale Kontaktstelle. Dort können Spannungen auftreten, die zu einer plastischen Verformung der reflektierenden Fläche führen. Des Weiteren sollte eine tangentielle Kontaktstelle im Prototyp abgebildet werden, da das genaue Verhalten dieser Stelle bei Belastung unklar ist.

Daher wird empfohlen, den in Abbildung 40 rot markierten Ausschnitt eines Elements des oberen Reflektors für die Konstruktion des Prototyps zu wählen. Für diesen Ausschnitt sind die beiden mittleren Strömungskanäle gewählt worden. Damit ist der Aufbau symmetrisch, wodurch der Konstruktions- und Fertigungsaufwand reduziert werden kann.

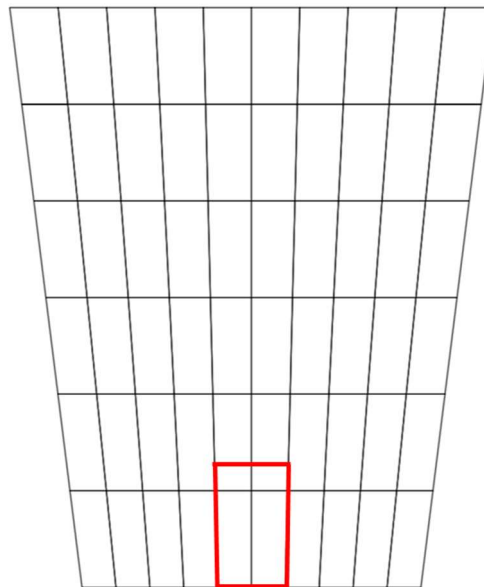


Abbildung 40: Gewählter Ausschnitt eines Elements des oberen Sekundärreflektors für den Prototyp

5.2. Empfehlungen zu den Systemgrenzen

Dadurch, dass im Prototyp nur ein Ausschnitt eines Sekundärreflektors abgebildet werden kann, sollten an den Systemgrenzen die Einflüsse simuliert werden, die im vollständigen

Reflektor auftreten würden. An den Systemgrenzen treten mechanische, thermische und strömungsmechanische Effekte auf.

An den äußeren Seitenwänden des Prototyps fehlt der mechanische Einfluss der benachbarten Segmente. Daraus resultiert, dass die Druckkräfte, die im Reflektor an der tangentialen Kontaktstelle entstehen können, im Prototyp auf die Seitenwände der Kanalkontur wirken. Es besteht die Gefahr, dass sich die Kanalkontur unter dieser Belastung verbiegt und damit keine oder nur eine reduzierte Bewegung der Reflexionsfläche in Strömungsrichtung stattfindet. Eine Möglichkeit, um dem entgegen zu wirken, ist die Anbringung einer unterstützenden Struktur an den äußeren Seitenwänden des Prototyps.

Hinzu kommt, dass an den äußeren Seitenwänden des Prototyps Wärme über emittierte Wärmestrahlung und freie Konvektion direkt an die Umgebung abgegeben werden kann. Dies findet in den Sekundärreflektoren so nicht statt. Dort kann Wärme nur über eine Wärmeleitung an benachbarte Segmente oder eine räumlich begrenzte freie Konvektion, die sich im gebildeten Spalt an der tangentialen Kontaktstelle einstellt, abgegeben werden. Es ist davon auszugehen, dass die im vollständigen Reflektor auftretende Wärmeabgabe an der tangentialen Kontaktstelle geringer ist als die Wärmeabgabe an den äußeren Seitenwänden des Prototyps. Daher wird eine Wärmedämmung an den äußeren Seitenwänden des Prototyps empfohlen.

Um den Prototyp unter maximalen Bedingungen testen zu können, muss dieser Strahlungssintensitäten von bis zu 200 kW/m^2 ausgesetzt werden (Schöttl 2020). Diese sollten räumlich so exakt abgegrenzt werden, dass sie nur auf die Flächen treffen, die auch im Reflektor mit Strahlung belastet werden. Ansonsten würde Wärme an nicht dafür vorgesehenen Stellen ins System gelangen, sodass die im Prototyp auftretende Temperaturverteilung keine Aussagen über das Verhalten des belasteten Sekundärreflektors zulassen würde. Deshalb wird für den Prototyp empfohlen, einen Strahlenschutz um die abgebildeten Segmente der Reflexionsfläche anzubringen.

Wird im Prototyp nicht die komplette Länge der Strömungskanäle abgebildet, tritt der daraus resultierende Druckverlust nicht auf. Dieser ist jedoch notwendig, damit sich in den Überlappungsspalten des Prototyps eine ähnliche Kühlung durch erzwungene Konvektion einstellt wie im kompletten Reflektor. Der fehlende Druckverlust kann mit einem zusätzlichen Strömungswiderstand erreicht werden. Dafür wird ein an die Bedingungen angepasstes Lochblech empfohlen, da dies einen über den Strömungsquerschnitt homogenen Staudruck erzeugt.

In Abbildung 41 ist der im Prototyp empfohlene Ausschnitt der Reflexionsfläche zusammen mit einer vereinfachten Kanalkontur dargestellt. Zusätzlich dazu sind an dieser Darstellung alle empfohlenen Maßnahmen verortet, die die fehlenden Einflüsse an den Systemgrenzen simulieren.

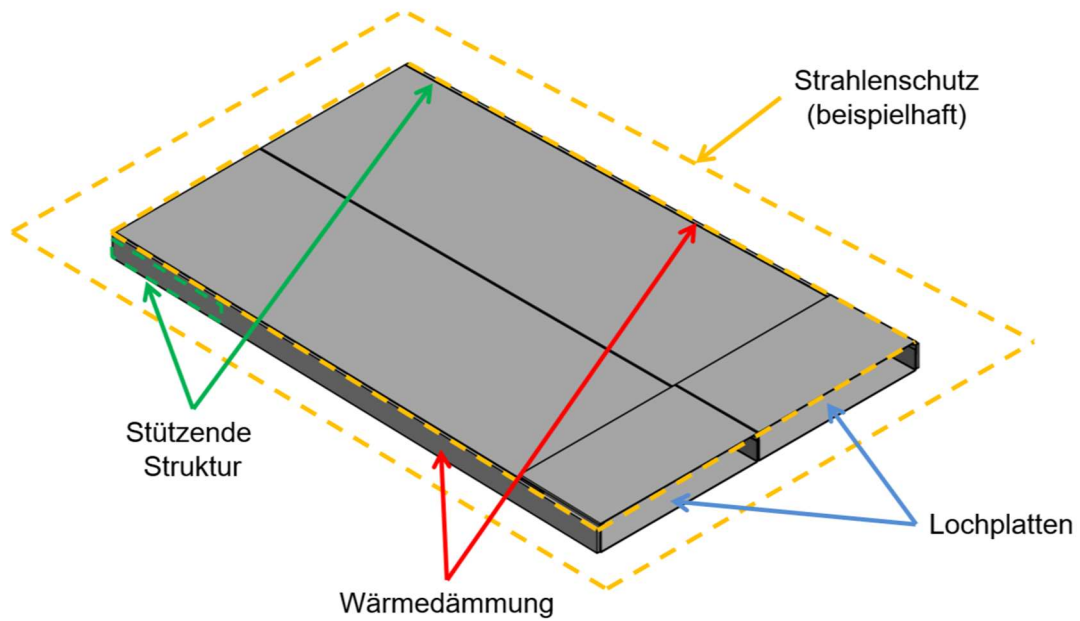


Abbildung 41: Reflexionsfläche im Prototyp mit vereinfachter Kanalkontur und empfohlenen Maßnahmen an den Systemgrenzen

6. Fazit

Im Rahmen dieser Arbeit ist ein Gesamtentwurf der Baugruppe Reflexionsfläche erarbeitet worden und es wurden darauf aufbauend Empfehlungen für die Konstruktion des Prototyps gegeben. Eine Ausarbeitung weiterer Baugruppen wurde durch die zeitliche Begrenzung dieser Arbeit ausgeschlossen.

Es konnte in den numerischen Analysen der Reflexionsfläche gezeigt werden, dass die Belastung durch konzentrierte Solarstrahlung dominant ist. Durch die auftretenden Temperaturgradienten können Spannungen entstehen, die zu einer plastischen Verformung führen. Dadurch sind die Gestaltungsmöglichkeiten der Segmente stark eingegrenzt. Darüber hinaus mussten Maßnahmen entwickelt werden, die über einen Abbau von Temperaturdifferenzen in einzelnen Bauteilen zu einer Entlastung der Baugruppe führen.

Die Reflexionsfläche konnte jedoch nicht so gestaltet werden, dass bei maximaler Belastung keine plastische Verformung auftritt. An den unteren Kanten der Seitenwände kann das Segment plastisch gestaucht werden. Im Überlappungsbereich der reflektierenden Fläche, der an der radialen Kontaktstelle entsteht, können hohe Zug- und Druckspannungen auftreten, die ebenfalls zu einer plastischen Verformung führen. Die genauen Auswirkungen dieser Verformungen auf die Funktion der Reflexionsfläche gehen aus den Analysen dieser Arbeit nicht hervor.

7. Kritik

Bei der Konzeptfindung wurden die Konzepte erarbeitet, aus denen sich die abschließende Gestalt der Reflexionsfläche zusammensetzt. Die Ergebnisse der Konzeptfindung haben somit großen Einfluss auf die Machbarkeit des Sekundärreflektors. Um möglichst viele unterschiedliche Ideen zu generieren, sind deshalb mehrere Methoden bei der Konzeptfindung angewandt worden. Dennoch konnte nur ein Teil aller Umsetzungsmöglichkeiten für die konstruktiven Schwerpunkte erarbeitet werden. Folglich entspricht der erarbeitete Gesamtentwurf nicht der optimalen Lösung. In einer intensiveren Konzeptfindung hätten mehr und eventuell auch bessere Konzepte erarbeitet werden können. Jedoch stand für diesen Arbeitsschritt nur ein begrenzter zeitlicher Aufwand zur Verfügung.

Zudem konnten sich im Konstruktionsprozess nur die Konzepte durchsetzen, die nach einer Bewertung anhand der Merkmale der Anforderungsliste am vielversprechendsten erschienen. Diese Bewertung wurde ohne eine praktische Untersuchung der Konzepte vorgenommen und basiert zum Teil auf theoretischen Annahmen. Damit spiegelt die Bewertung nur bedingt die tatsächlichen Eigenschaften der Konzepte wider.

Die Belastung des Sekundärreflektors stellt in der Realität einen sehr komplexen Fall dar. Es treten viele Effekte auf, die sich gegenseitig beeinflussen. In den Berechnungen und FEM-Untersuchungen wurden einige Einflüsse vernachlässigt oder vereinfacht. Beispielsweise wurde die Änderung der Strömungsgeschwindigkeit bei Verformung der Segmente nicht berücksichtigt. Eine Berücksichtigung dieser Effekte hätte zu häufigen und großen Iterationsschritten und zu einer deutlichen Steigerung des Rechenaufwands geführt. Die Effekte, die in den Berechnungen berücksichtigt wurden, sind so vereinfacht worden, dass sie, wenn möglich, den ungünstigsten bekannten Fall annehmen. Dadurch wurde indirekt eine Sicherheit in der Berechnung angenommen.

Die Ergebnisse der numerischen Analysen zur Auslegung der Konzepte haben gezeigt, dass die Reflexionsfläche der Sekundärreflektoren stark beansprucht wird, sodass das

Trägermaterial der reflektierenden Beschichtung plastisch verformt werden kann. Da dies negative Auswirkungen auf die Umsetzbarkeit des Sekundärreflektors hat, musste diese Baugruppe intensiver betrachtet werden. Eine Betrachtung weiterer Baugruppen war daher zeitlich nicht mehr möglich.

8. Ausblick

Anschließend an die konzeptionelle Konstruktion der Baugruppe Reflexionsfläche in dieser Arbeit müssen für die Konstruktion des Prototyps auch die Baugruppen Kanalkontur, Lüfter und Tragende Struktur ausgelegt werden. Im weiteren Verlauf des Projekts SolSec sollten dann die in der Untersuchung des Prototyps zu messenden Kenngrößen zusammen mit geeigneten Messmethoden festgelegt werden. Gegebenenfalls müssen für diese Messmethoden Anpassungen in der Gestalt des Prototyps vorgenommen werden. Damit ist die Gestalt des Prototyps vollständig festgelegt und kann detailliert ausgearbeitet werden.

Im Anschluss daran sind Hersteller zu finden, die die einzelnen Bauteile fertigen. Erst nachdem der Prototyp montiert wurde, kann er getestet werden. Das weitere Vorgehen hängt dann von diesen Ergebnissen ab.

Anhand der Ergebnisse dieser Arbeit bietet es sich an, zusätzlich zur Prüfung des Prototyps die Beständigkeit der reflektierenden Beschichtung bei mechanischer Belastung und unterschiedlichen Temperaturen zu untersuchen. Damit lässt sich die Belastungsgrenze besser definieren und die Ergebnisse zukünftiger numerischer Analysen besser bewerten.

9. Literaturverzeichnis

- Baumann, Torsten; Puppe, Michael; Frantz, Cathy; Giuliano, Stefano; Flesch, Robert; Uhlig, Ralf (2017): HPMS - High Performance Molten Salt Tower Receiver System.
- Buck, Rainer (2003): Modularer Druck-Receiver für solarunterstützte fossile Gasturbinen- und Kombikraftwerke (REFOS-2). Schlussbericht. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt. Stuttgart.
- Climate-data.org (2020): Klima Ouarzazate (Marokko). Daten und Graphen zum Klima und Wetter für Ouarzazate. Hg. v. Climate-data.org. Online verfügbar unter <https://de.climate-data.org/afrika/marokko/ouarzazate/ouarzazate-29482/>, zuletzt aktualisiert am 23.08.2020.
- COLEBROOK, C. F. (1939): TURBULENT FLOW IN PIPES, WITH PARTICULAR REFERENCE TO THE TRANSITION REGION BETWEEN THE SMOOTH AND ROUGH PIPE LAWS.
- Deutsche Edelstahlwerke (2015): Werkstoffdatenblatt X5CrNi18-10 1.4301. Deutsche Edelstahlwerke. Witten. Online verfügbar unter https://www.dew-stahl.com/fileadmin/files/dew-stahl.com/documents/Publikationen/Werkstoffdatenblaetter/RSH/1.4301_de.pdf, zuletzt geprüft am 23.08.2020.
- Dou, Ruifeng; Ge, Tianran; Liu, Xunliang; Wen, Zhi (2016): Effects of contact pressure, interface temperature, and surface roughness on thermal contact conductance between stainless steel surfaces under atmosphere condition. In: *International Journal of Heat and Mass Transfer*.
- Dropkin, D.; Somerscales, E. (1965): Heat Transfer by Natural Convection in Liquids Confined by Two Parallel Plates Which Are Inclined at Various Angles With Respect to the Horizontal. In: *Journal of Heat Transfer* 87 (1), S. 77–82.
- Euro Inox, Brüssel (2016): Rauheitsmaße bei Oberflächen von nichtrostendem Stahl. Merkblatt 984. Hg. v. Informationsschnittstelle Edelstahl Rostfrei. Düsseldorf. Online verfügbar unter https://www.edelstahl-rostfrei.de/fileadmin/user_upload/ISER/downloads/MB_984_Rauheitsmasse.pdf, zuletzt aktualisiert am 23.08.2020.
- Feldhusen, Jörg; Grote, Karl-Heinrich (Hg.) (2013): Pahl/Beitz Konstruktionslehre. Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung. 8., vollständig überarbeitete Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg.
- Gerkamp, Patrick (2020): Thermisch-mechanische Optimierung eines Sekundärreflektors. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt.
- Gledhill, Sophie (2019): SOLSEC. Sekundärreflektoren für Turmreceiver. Gesamtvorhabenbeschreibung. Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme.
- Gledhill, Sophie (2020): Unveröffentlichtes Dokument. Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme. Freiburg.
- Gnielinski, V. (2013): On heat transfer in tubes. In: *International Journal of Heat and Mass Transfer* 63, S. 134–140.
- Grigull, Ulrich; Merker, Günter P. (1987): Konvektive Wärmeübertragung. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Herrmann, Ulf; Kelly, Bruce; Price, Henry (2004): Two-tank molten salt storage for parabolic trough solar power plants. In: *Energy* 29 (5-6), S. 883–893.
- Idelčik, Isaak Evseevič; Ginevskii, Aron Semenovich (Hg.) (2007): Handbook of hydraulic resistance. 4., rev. and augmented ed. Redding, Conn.: Begell House.

- IRENA (2019): renewable Power Generation Costs in 2018. International Renewable Energy Agency IRENA. Abu Dhabi.
- IRENA (2020): Renewable capacity statistics 2020. International Renewable Energy Agency IRENA. Abu Dhabi.
- Kakaç, Sadık (Hg.) (1987): Handbook of single-phase convective heat transfer. New York: Wiley (A Wiley-Interscience publication).
- Lahlou, Radia; Armstrong, Peter R.; Calvet, Nicolas; Slocum, Alexander H.; Shamim, Tariq: Testing of a secondary concentrator integrated with a beam-down tower system under non-liquid cooling strategies.
- Moghim, M. A.; Craig, K. J.; Meyer, J. P. (2017): Simulation-based optimisation of a linear Fresnel collector mirror field and receiver for optical, thermal and economic performance. In: *Solar Energy* 153, S. 655–678.
- Richter, Friedhelm (2015): Die physikalischen Eigenschaften der Stähle. "Das 100 - Stähle - Programm". Teil I: Tafeln und Bilder. Mülheim a. d. Ruhr.
- Roth, Karlheinz (2001): Kataloge. 3. Aufl., mit wesentlichen Erg. Berlin: Springer (Konstruieren mit Konstruktionskatalogen, / Karlheinz Roth ; Bd. 2).
- Schiller, L. (1923): Über den Strömungswiderstand von Rohren verschiedenen Querschnitts und Rauigkeitsgrades. In: *Z. angew. Math. Mech.* 3 (1), S. 2–13.
- Schöttl, Peter (2020): Unveröffentlichtes Dokument. Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme. Freiburg.
- Schöttl, Peter; Zoschke, Theda; Frantz, Cathy; Gilon, Yoel; Heimsath, Anna; Fluri, Thomas (2019): Performance assessment of a secondary concentrator for solar tower external receivers. Hg. v. AIP Conference Proceedings.
- Singhal, Vishal; Litke, Paul J.; Black, Anthony F.; Garimella, Suresh V. (2005): An experimentally validated thermo-mechanical model for the prediction of thermal contact conductance. In: *International Journal of Heat and Mass Transfer* 48 (25-26), S. 5446–5459.
- Solidworks (2015): Thermischer Kontaktwiderstand. Online verfügbar unter http://help.solidworks.com/2015/german/SolidWorks/cworks/c_Thermal_Contact_Resistance.htm, zuletzt aktualisiert am 23.08.2020.
- Stephan, Peter; Kabelac, Stephan; Kind, Matthias (2019): VDI-Wärmeatlas. Fachlicher Träger VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen. 12th ed. 2019 (VDI Springer Reference).
- Thermographie Xtra (2020): Emissionsgrad-Tabelle. Thermographie Xtra. Online verfügbar unter <https://www.thermografie-xtra.de/tipps-tricks/emissionsgrad-tabelle>, zuletzt aktualisiert am 23.08.2020.
- Uhlig, R.; Hensch, G.; Söhn, M. (2015): Quarzglas-Fenster für Hochtemperatur-Druckreceiver in Solarturmkraftwerken : öffentlicher Abschlussbericht. Verbundvorhaben SOLTREC-II: DLR Stuttgart, Institut für Solarforschung.
- Uhlig, Ralf; Fernández García, Aránzazu; Sutter, Florian (2017a): RAISELIFE. Raising the Lifetime of Functional Materials for Concentrated Solar Power Tower Technology. Thermal field and interaction of secondary reflector with absorber. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt. Stuttgart.
- Uhlig, Ralf; Frantz, Cathy; Hertel, Johannes; Gilon, Yoel (2017b): Thermal Analysis and Design of a Secondary Concentrator for External Molten Salt Receivers. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt. Stuttgart.
- VDI-2087: Luftreinigungssysteme Bemessungsgrundlagen. In: VDI-Handbuch Technische Gebäudeausrüstung, Bd. 2.

Zhu, Guangdong; Libby, Cara (2017): Review and future perspective of central receiver design and performance. Hg. v. AIP Conference Proceedings.

10. Anhang

A. Werkstoffdaten von 1.4301

In Tabelle 8 sind die Eigenschaften von 1.4301 im elastischen Bereich temperaturabhängig dargestellt (Richter 2015). Die Belastungsgrenzen von 1.4301 sind in Tabelle 9 aufgeführt (Deutsche Edelstahlwerke 2015).

Tabelle 8: Temperaturabhängige Materialdaten von 1.4301 im elastischen Bereich

Dichte bei 20 °C: 7919 kg/m ³				
Temperatur ϑ [°C]	Differentieller Wärmeausdehnungskoeffizient 10^{-6} [K ⁻¹]	Elastizitätsmodul [GPa]	Poissonzahl	Wärmeleitfähigkeit [W/(m K)]
-50	14,8	202	0,274	13,4
-25	15,3	200	0,275	13,9
0	15,8	198	0,276	14,4
20	16,1	196	0,277	14,8
50	16,6	194	0,279	15,4
100	17,2	190	0,282	16,2
150	17,7	186	0,284	17
200	18,1	182	0,287	17,8
250	18,5	178	0,29	18,5
300	18,8	174	0,293	19,2
350	19,2	170	0,296	19,9
400	19,5	166	0,298	20,6
450	19,8	162	0,301	21,3
500	20,1	158	0,304	22

Tabelle 9: Belastungsgrenzen von 1.4301

Temperatur ϑ [°C]	Streckgrenze R_e [N mm ⁻²]	1 % - Dehngrenze $R_{p1,0}$ [N mm ⁻²]	Zugfestigkeit R_m [N mm ⁻²]
50	200	210	493
100	157	191	450
150	142	172	420
200	127	157	400
250	118	145	390
300	110	135	380
350	104	129	380
400	98	125	380
450	95	122	370
500	92	120	360

B. Aufbereitung Ray-Tracing Analyse

Es liegt eine Verteilung der absorbierten Konzentration der solaren Direktnormalstrahlung für den gesamten Sekundärreflektor bei unterschiedlichen Offsets vor. Als Zeitpunkt für die Analyse wurde der Tag der Sommersonnenwende (21.06) um 13:30 Uhr gewählt. Zudem liegen diesen Daten ein Reflexionsgrad der reflektierenden Beschichtung von 90 % und Strahlungsintensitäten der Sonne je nach Offset zwischen 744 W/m^2 und 782 W/m^2 zugrunde (Schöttl 2020).

In den Berechnungen werden die größtmöglichen Belastungen des Reflektors angenommen, um die Konstruktion für alle Lastfälle auszulegen. Durch einen Vergleich aller Konzentrationsverteilungen bei empfohlenem Offset ließen sich die stärksten Belastungen des oberen und unteren Reflektors bestimmen. Die Umrechnung der absorbierten Konzentrationsverteilung in eine Verteilung der absorbierten Strahlungsintensität berücksichtigt zusätzlich eine mögliche Verschmutzung der reflektierenden Fläche. Damit wird die absorbierte Strahlungsintensität für einen Reflexionsgrad von 85 % berechnet (Gerkamp 2020). Im Folgenden ist diese Berechnung für die plane Reflexionsfläche und die Biegeradien beschrieben.

Die absorbierte Strahlungsintensität ergibt sich aus dem Produkt der Direktnormalstrahlung I_{DNI} und der absorbierten Konzentration c_{abs} . Dabei ist zu beachten, dass der Reflexionsgrad 85 % betragen soll. Somit gilt:

$$I_{\text{abs},85\%} = I_{\text{DNI}} \cdot c_{\text{abs},85\%}$$

Allerdings liegen nur Daten für die absorbierte Konzentration bei $\rho = 90\%$ vor. Eine Anpassung dieser Werte ist somit erforderlich. Da unterschiedliche Reflexionsgrade keine Auswirkungen auf den Zusammenhang zwischen der absorbierten Konzentration und der eintreffenden Konzentration c haben, gilt:

$$c = \frac{c_{\text{abs},90\%}}{1 - \rho_{90\%}} = \frac{c_{\text{abs},85\%}}{1 - \rho_{85\%}}$$

Abschließend erhält man für die absorbierte Strahlungsintensität bei einem Reflexionsgrad von 85 %:

$$I_{\text{abs},85\%} = I_{\text{DNI}} \cdot c_{\text{abs},90\%} \cdot 1,5$$

Trifft Strahlung wie in Abbildung 42 auf zwei aneinander liegende Radien, so ändert die Geometrie die Absorptionsfähigkeit der Oberfläche. Wie sich der absorbierte Anteil der Strahlung ändert, ist dabei abhängig vom Winkel φ und dem Reflexionsgrad ρ der Oberfläche.

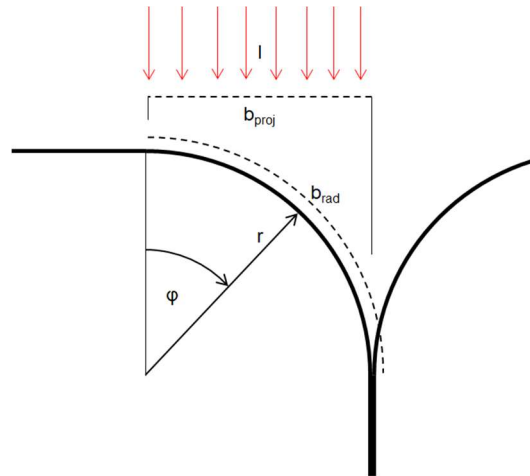


Abbildung 42: Senkrecht eintreffende Strahlung auf Biegeradien

Bei einem Reflexionsgrad zwischen 85 % und 90 % steigt die Absorptionsfähigkeit ab einem Winkel φ von etwa 60 ° an. Die maximale Verstärkung um bis zu 70 % tritt bei einem Winkel von etwa 85 ° auf. Durch die Abnahme des Sichtfaktors bei Winkeln $\varphi > 85^\circ$ wird dieser Effekt jedoch abgeschwächt. Insgesamt betrachtet ist die Änderung der absorbierten Konzentration an den Biegeradien in diesem Fall also nur minimal und wird deshalb vernachlässigt (Schöttl 2020).

Für die Simulationen wird die Verteilung der absorbierten Strahlungsintensität jedoch vereinfacht. Es wird angenommen, dass sich der Wärmefluss, der über die projizierte Breite der Radien b_{proj} auf das Modell wirkt, homogen über die Bogenlänge der Radien b_{rad} verteilt. Damit bleibt die auf das Modell wirkende Wärmemenge konstant, es ändert sich lediglich deren Verteilung.

Durch diese Vereinfachung gilt die folgende Leistungsbilanz:

$$I_{\text{abs,proj}} \cdot A_{\text{proj}} = I_{\text{abs,rad}} \cdot A_{\text{rad}}$$

Mit der Abhängigkeit der projizierten Breite und der Bogenlänge vom Radius r entsteht der Zusammenhang:

$$I_{\text{abs,rad}} = I_{\text{abs,proj}} \cdot \frac{2}{\pi}$$

Zusammenfassend ergibt sich für absorbierte Strahlungsintensität an den Biegeradien:

$$I_{\text{abs,rad}} = I_{\text{DNI}} \cdot c_{\text{abs,90\%}} \cdot 1,5 \cdot \frac{2}{\pi}$$

Aus diesen Daten lassen sich nun verschiedene Belastungsverläufe über die Länge des Reflektors ableiten. Für den oberen und den unteren Reflektor werden jeweils sechs Belastungsverläufe erstellt, die den innersten Bereich des Reflektors von 0 mm bis 1000 mm und von 1000 mm bis 2000 mm beschreiben. Im Verlauf „höchste Temperatur“ sind die höchsten Intensitäten, die über die Breite des Reflektorelements auftreten, zusammengefasst. Analog dazu sind die niedrigsten Intensitäten im Verlauf „niedrigste Temperatur“ zusammengefasst. Der Verlauf „höchster Gradient“ beinhaltet den höchsten Abfall der Intensität über die Länge. Damit stellen die Verläufe die möglichen Extremfälle dar. Zur vollständigen Abbildung der betrachteten Länge wurde der Verlauf durch eine lineare Trendlinie vereinfacht und anschließend extrapoliert. In Abbildung 43 bis Abbildung 46 sind die Verläufe der absorbierten Intensität über die Länge des Reflektors abgebildet.

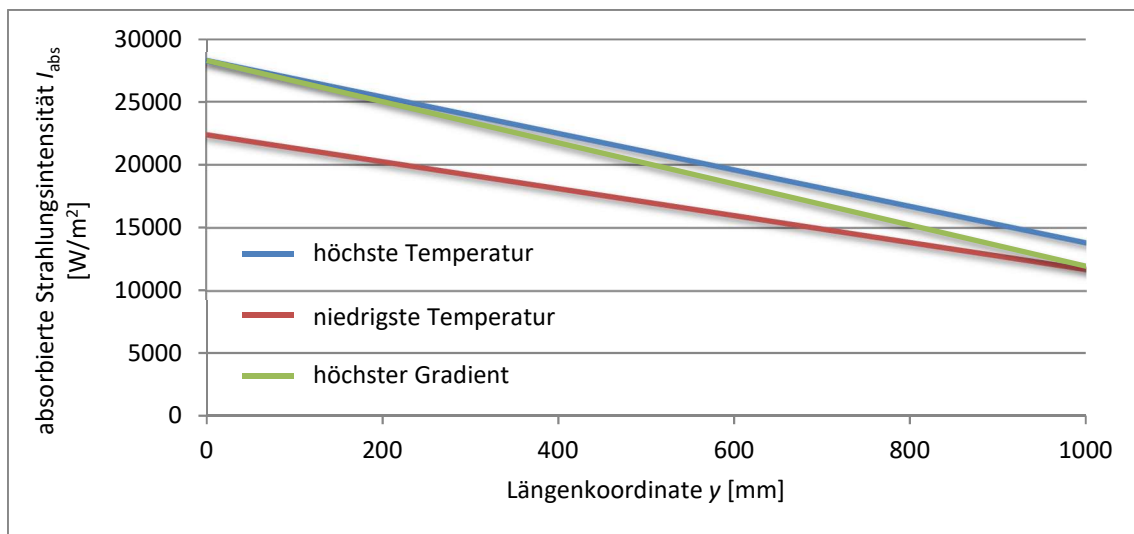


Abbildung 43: Belastungsverläufe des ersten Segments des oberen Reflektors

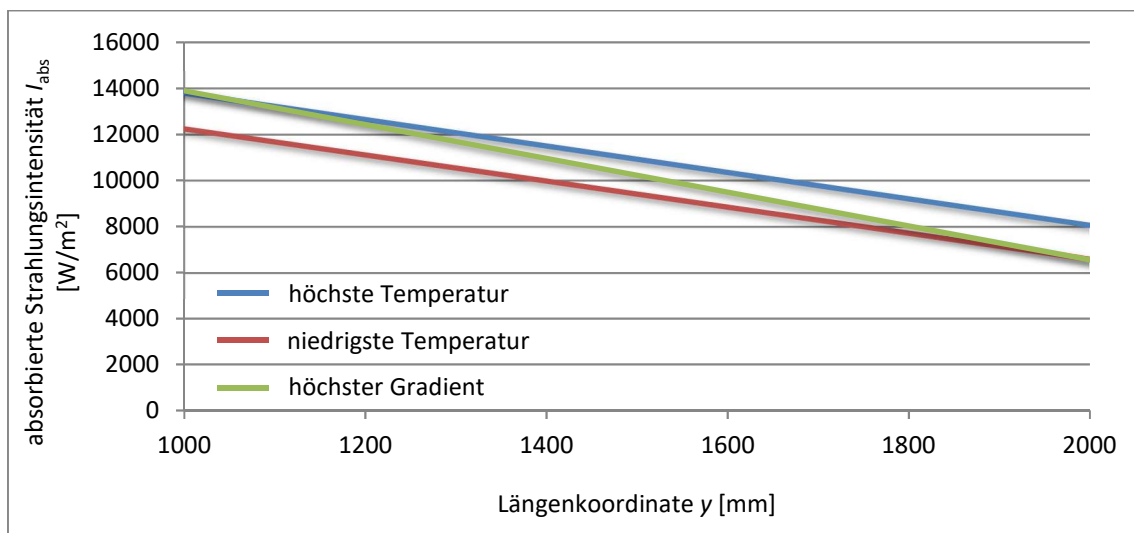


Abbildung 44: Belastungsverläufe des zweiten Segments des oberen Reflektors

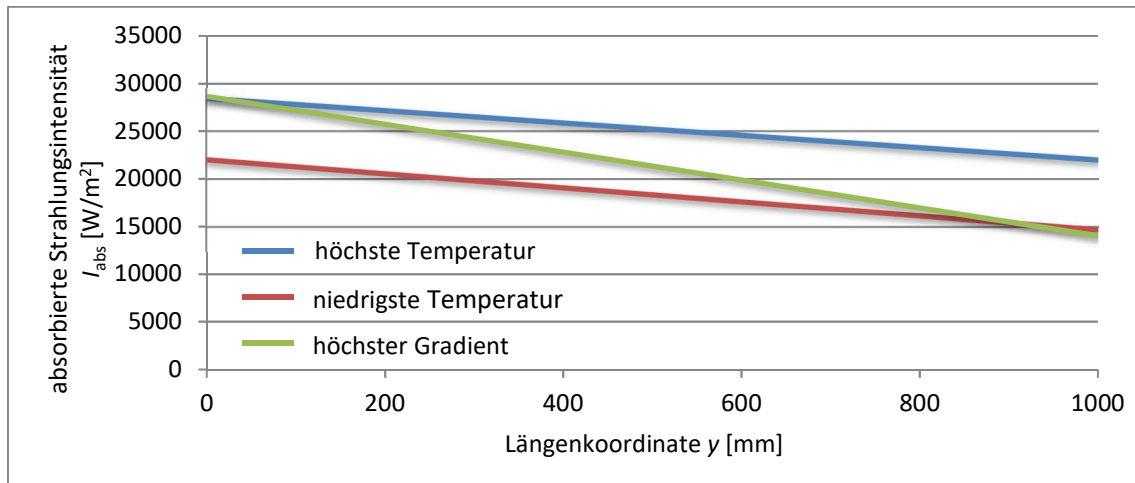


Abbildung 45: Belastungsverläufe des ersten Segments des unteren Reflektors

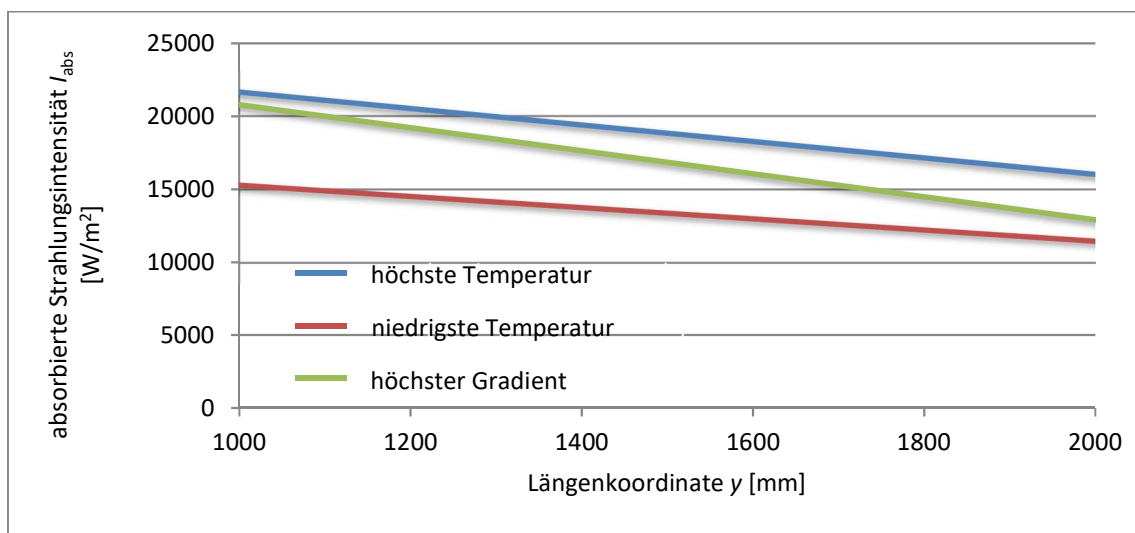


Abbildung 46: Belastungsverläufe des zweiten Segments des unteren Reflektors

C. Segmentbewegungen bei ausgewähltem Lagerungsprinzip

Directional Deformation
Type: Directional Deformation(X Axis)
Unit: mm

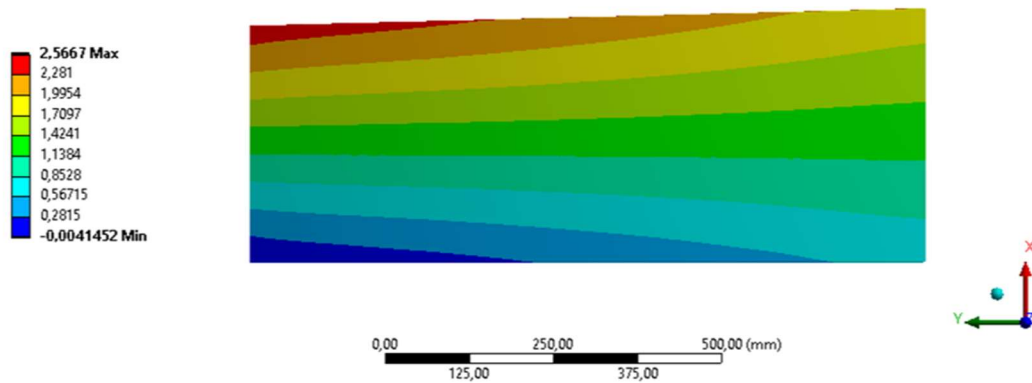


Abbildung 47: Bewegung in X-Richtung des Vorentwurfs

Directional Deformation 2
Type: Directional Deformation(Y Axis)
Unit: mm

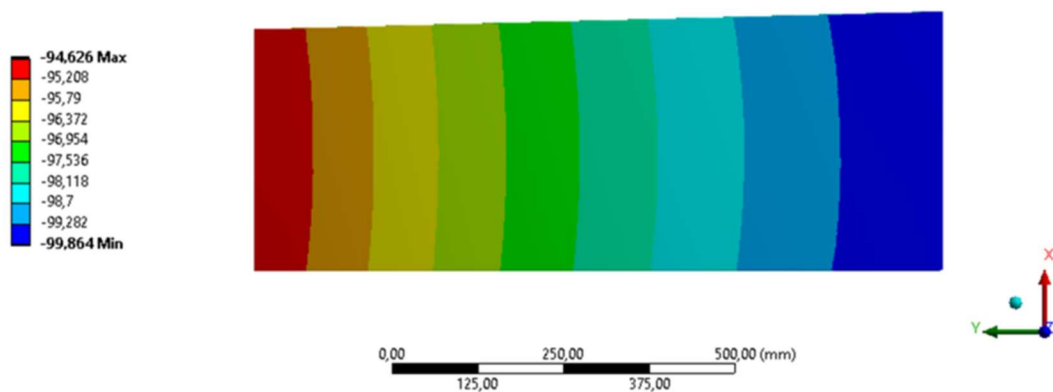


Abbildung 48: Bewegung in Y-Richtung des Vorentwurfs

Directional Deformation 3
Type: Directional Deformation(Z Axis)
Unit: mm

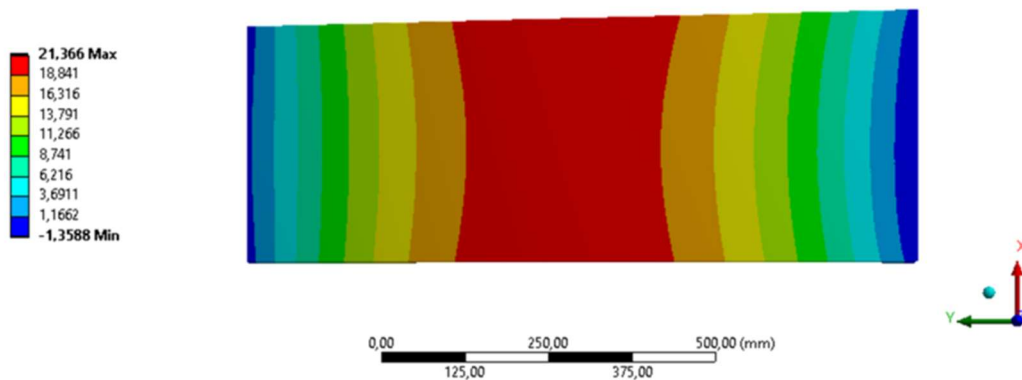


Abbildung 49: Bewegung in Z-Richtung des Vorentwurfs

D. Ermittlung des spezifischen thermischen Kontaktwiderstands

Zwischen zwei aneinander liegenden Oberflächen fester Körper herrscht ein thermischer Kontaktwiderstand. Dieser ist abhängig von vielen Faktoren, unter anderem von (Dou et al. 2016):

- dem Fluid in den Zwischenräumen
- dem Anpressdruck der Oberflächen
- der Oberflächentemperatur der Körper
- der Oberflächenbeschaffenheit

Für die hier vorliegenden Fälle können diese Bedingungen nur grob abgeschätzt werden. Aus den Simulationsergebnissen ergibt sich, dass die Oberflächentemperatur der Kontaktflächen zwischen 50 °C und 300 °C liegt. Laut (Euro Inox 2016) variiert der Mittenrauwert von Edelstahl je nach Bearbeitungsverfahren von 0,1 µm bis 12 µm. Da sich die Bauteile relativ zueinander bewegen können müssen (Lagerung) oder nur sehr geringen Kräften unterliegen (Ausgleichsblech), muss der Anpressdruck sehr klein gewählt werden. Der mittlere Anpressdruck soll deshalb < 1 MPa sein.

(Singhal et al. 2005) gibt den spezifischen thermischen Kontaktwiderstand R'_{th} für niedrige Temperaturen an und (Dou et al. 2016) für Temperaturen ab 350 °C. Weiterhin wurden beide experimentelle Untersuchungen mit variablem Anpressdruck für mehrere Proben mit unterschiedlich rauen Oberflächen durchgeführt. Diese Ergebnisse unterstützen den in (Solidworks 2015) angegebenen Bereich für den spezifischen thermischen Kontaktwiderstand.

Für thermischen Kontaktwiderstand der vorliegenden Kontaktstellen gilt damit:

$$2,5 \cdot 10^{-4} \frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}} \geq R'_{th} \geq 5 \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}}$$

E. Temperaturverteilung auf dem Absorber

(Schöttl 2020) gibt Temperaturverteilungen auf den Absorber bei unterschiedlichen Offsets an. Für die Berechnung der emittierten Wärmestrahlung auf die innerste radiale Kontaktstelle wurde die Verteilung des heißesten Absorberpanels (Panel Nr. 11) bei einem Offset von -10 % verwendet. Über die Breite des Panels wurde die Temperatur gemittelt und anschließend über die Absorberhöhe interpoliert. Daraus hat sich die in Tabelle 10 aufgeführte Temperaturverteilung über die Höhe des Absorbers ergeben.

Tabelle 10: Temperaturverteilung über die Höhe des Absorbers

Höhe auf dem Absorber [m]	Temperatur [°C]	Höhe auf dem Absorber [m]	Temperatur [°C]	Höhe auf dem Absorber [m]	Temperatur [°C]	Höhe auf dem Absorber [m]	Temperatur [°C]
0,05	588	3,85	611	7,65	602	11,45	595
0,15	588	3,95	611	7,75	602	11,55	594
0,25	589	4,05	611	7,85	602	11,65	594
0,35	590	4,15	610	7,95	601	11,75	593
0,45	591	4,25	610	8,05	601	11,85	592
0,55	592	4,35	610	8,15	601	11,95	592
0,65	593	4,45	610	8,25	601	12,05	591
0,75	594	4,55	609	8,35	601	12,15	590
0,85	596	4,65	609	8,45	601	12,25	590
0,95	597	4,75	609	8,55	600	12,35	589
1,05	598	4,85	609	8,65	600	12,45	588
1,15	599	4,95	609	8,75	600	12,55	587
1,25	601	5,05	609	8,85	600	12,65	586
1,35	602	5,15	609	8,95	600	12,75	585
1,45	603	5,25	609	9,05	600	12,85	584
1,55	604	5,35	608	9,15	599	12,95	583
1,65	605	5,45	607	9,25	599	13,05	582
1,75	606	5,55	607	9,35	599	13,15	581
1,85	607	5,65	606	9,45	599	13,25	579
1,95	608	5,75	606	9,55	599	13,35	578
2,05	609	5,85	606	9,65	598	13,45	577
2,15	610	5,95	605	9,75	598	13,55	575
2,25	610	6,05	605	9,85	598	13,65	574
2,35	611	6,15	605	9,95	598	13,75	573
2,45	611	6,25	604	10,05	598	13,85	571
2,55	612	6,35	604	10,15	597	13,95	570
2,65	612	6,45	604	10,25	597	14,05	568
2,75	612	6,55	604	10,35	597	14,15	566
2,85	613	6,65	603	10,45	597	14,25	565
2,95	613	6,75	603	10,55	597	14,35	563
3,05	613	6,85	603	10,65	597	14,45	561
3,15	613	6,95	603	10,75	597	14,55	559
3,25	613	7,05	603	10,85	596	14,65	558
3,35	613	7,15	603	10,95	596	14,75	556
3,45	612	7,25	602	11,05	596		
3,55	612	7,35	602	11,15	596		
3,65	612	7,45	602	11,25	595		
3,75	612	7,55	602	11,35	595		

F. Berechnung der erzwungenen Konvektion im Überlappungsspalt

Für die Berechnung des Wärmekoeffizienten im Überlappungsspalt der innersten radialen Kontaktstelle musste zunächst die Temperatur der Luft nach dem ersten Segment und deren Strömungsgeschwindigkeit im Spalt ermittelt werden.

Es wurde angenommen, dass sich im ersten Segment ein stationärer Zustand mit einer homogenen Temperaturverteilung über den Querschnitt einstellt. Für die im ersten Segment an die Luft übertragene Leistung gilt damit:

$$\dot{Q}_{1S} = \sum \alpha_i \cdot A(\alpha_i) \cdot \bar{\vartheta}(\alpha_i)$$

Dadurch wird der Luftstrom im ersten Segment um $\Delta\vartheta_{1S}$ erwärmt. Mit dem folgenden Zusammenhang lässt sich die Temperaturdifferenz bestimmen:

$$\Delta\vartheta_{1S} = \frac{\dot{Q}_{1S}}{\dot{m}_{1S} \cdot c_{p,1S}}$$

Dabei wurde die spezifische Wärmekapazität c_p in diesem Temperaturbereich als konstant betrachtet. Der Massenstrom \dot{m}_{1S} ergibt sich aus der Strömungsgeschwindigkeit, der Luftdichte $\rho(\vartheta_{amb})$ und des Kanalquerschnitts am Einströmpunkt A_{ein} :

$$\dot{m}_{1S} = w_{ein} \cdot \rho_D(\vartheta_{amb}) \cdot A_{ein}$$

Mit den Werten aus Tabelle 11 ergibt sich für die Temperatur ϑ_0 der Luft nach dem ersten Segment:

$$\vartheta_0 = \vartheta_{amb} + \Delta\vartheta_{1S} \approx 60 \text{ °C}$$

Tabelle 11: Daten für die Berechnung der Erwärmungsdauer

Größe	Wert	Quelle
Wärmeübergangskoeffizient $\alpha_{unbeheizt}$	43 W/(m ² K)	(Gerkamp 2020)
Wärmeübergangskoeffizient $\alpha_{beheizt}$	56,4 W/(m ² K)	(Gerkamp 2020)
Fläche $A(\alpha_{unbeheizt})$	0,455 m ²	
Fläche $A(\alpha_{beheizt})$	0,345 m ²	
Mittlere Temperatur $\bar{\vartheta}(\alpha_{unbeheizt})$	117 °C	FEM Analyse
Mittlere Temperatur $\bar{\vartheta}(\alpha_{beheizt})$	294 °C	FEM Analyse
Umgebungstemperatur ϑ_{amb}	40 °C	(Gerkamp 2020)
Spezifische Wärmekapazität $c_{p,1S}$	1007 J/(kg K)	(Stephan et al. 2019)
Querschnittsfläche A_{ein}	0,0175 m ²	
Strömungsgeschwindigkeit w_{ein}	20 m/s	(Gerkamp 2020)
Dichte der Luft $\rho_D(\vartheta_{amb})$	1,112 kg/m ³	(Stephan et al. 2019)

In der folgenden Berechnung wurde die weitere Erwärmung der Luft vernachlässigt. Für die Dichte im Überlappungsspalt $\rho_{D,S}$ und im restlichen Kanal bedeutet dies:

$$\rho_D(\vartheta = 60^\circ\text{C}) = \rho_D = \rho_{D,K} = \rho_{D,S}$$

Zur Ermittlung der Strömungsgeschwindigkeit w_S im Spalt wurde der Druck nach dem ersten Segment bilanziert. Dazu wurde ein Ersatzschaubild erstellt, das alle für den Druck relevanten Einflüsse der radialen Kontaktstelle beinhaltet. In Abbildung 50 ist dieses Ersatzschaubild für Konzept RRK 2 dargestellt.

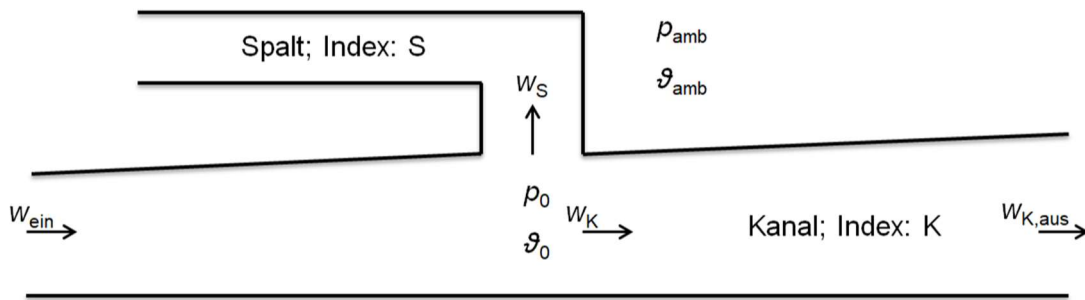


Abbildung 50: Ersatzschaubild für die Beschreibung des Drucks an der radialen Kontaktstelle

Durch die Differenz zwischen dem statischen Anteil des Drucks p_0 und dem Atmosphärendruck p_{amb} wird bei Konzept RRK 2 im Spalt ein dynamischer Druck $p_{dyn,S}$ erzeugt und der daraus resultierende Druckverlust $\Delta p_{V,S}$ überwunden. Der Druckverlust lässt sich durch eine Querschnittsänderung (Widerstandsbeiwert: ζ_Q), eine Umlenkung (Widerstandsbeiwert: ζ_U) und die Reibung im Spalt beschreiben. Damit wird der im Spalt auftretende Druckverlauf wie folgt bilanziert:

$$p_{0,stat} - p_{amb} = p_{dyn,S} + \Delta p_{V,S} = \frac{\rho_D}{2} w_S^2 + \left(\lambda_S \frac{l_S}{D_S} + \zeta_Q + \zeta_U \right) \frac{\rho_D}{2} w_S^2$$

In Konzept RRK 1 tritt keine Richtungsänderung des Luftmassenstroms auf, sodass der dynamische Druck im Spalt aus der Differenz des Totaldrucks im Kanal und dem Atmosphärendruck entsteht. Für den im Spalt auftretenden Druckverlauf gilt damit:

$$p_{0,stat} - p_{0,dyn} = p_{dyn,S} + \Delta p_{V,S} = \frac{\rho_D}{2} w_S^2 + \lambda_S \frac{l_S}{D_S} \cdot \frac{\rho_D}{2} w_S^2$$

Da der Spalt und der Kanal zwei parallel zueinander geschaltete Strömungswege sind, kann die Druckdifferenz zwischen Kanal und Atmosphäre auch kanalseitig definiert werden:

$$p_{0,stat} - p_{amb} = \Delta p_{V,K} - \Delta p_{dyn,K} = \lambda_K \frac{l_K}{D_K} \cdot \frac{\rho_D}{2} \frac{w_K^2 + w_{K,aus}^2}{2} - \frac{\rho_D}{2} (w_K^2 - w_{K,aus}^2)$$

Zusammen mit dem Kontinuitätsgesetz

$$\dot{m}_{1S} = \dot{m}_S + \dot{m}_K = w_S \cdot \rho_D \cdot A_S + w_K \cdot \rho_D \cdot A_K$$

lassen sich daraus die Strömungsgeschwindigkeiten w_S und w_K bestimmen. Weiterhin wurden in der Berechnung die folgenden Zusammenhänge verwendet:

Charakteristische Länge l_i (Schiller 1923): $D_i = \frac{4 \cdot A_i}{U_i}$

Rohrreibungszahl λ_i (COLEBROOK 1939): $\frac{1}{\sqrt{\lambda_i}} = -2 \log_{10} \left(\frac{2,51}{Re_i \sqrt{\lambda_i}} + \frac{K}{3,72 D_i} \right)$

Reynolds-Zahl Re_i : $Re_i = \frac{w_i \cdot D_i}{\nu}$

Widerstandsbeiwert ζ_Q (VDI-2087): $\zeta_Q = 0,5 \cdot \left(1 - \frac{A_S}{A_K} \right)$

Für die Berechnung des Wärmeübergangskoeffizienten wird das von (Kakaç 1987 und Gnielinski 2013) beschriebene Vorgehen zur Wärmeübertragung bei erzwungener Konvektion an einem ebenen Spalt angewandt.

Mit dem Hilfswert

$$\xi = (1,8 \cdot \log_{10}(Re) - 1,5)^{-2}$$

konnte die Nusselt-Zahl am Überlappungsspalt Nu_S bestimmt werden. Es gilt dafür die folgende Korrelation:

$$Nu_S = \frac{\left(\frac{\xi}{8}\right)(Re - 1000)Pr}{1 + 12,7 \sqrt{\frac{\xi}{8}} (Pr^{2/3} - 1)} \left[1 + \left(\frac{2 \cdot h_s}{l_s} \right)^{2/3} \right]$$

Abschließend ließ sich der Wärmeübergangskoeffizient α bestimmen:

$$\alpha = \frac{Nu_S \cdot \lambda_{\text{Wärme}}}{2 \cdot h_s}$$

In

Tabelle 12 sind die der Berechnung zugrunde liegenden Daten aufgelistet.

Tabelle 12: Daten für die Berechnung des Wärmeübergangskoeffizienten

Größe	Wert	Quelle
Dichte der Luft $\rho(\vartheta_0)$	1,046 kg/m ³	(Stephan et al. 2019)
Länge des Spalts l_s	60 mm	
Restliche Kanallänge l_k	5 m	
Spaltbreite b_s	376 mm	
Kanalbreite nach dem ersten Segment b_0	376 mm	
Kanalbreite am Ausgang $b_{K,aus}$	500 mm	
Spalthöhe h_s	variabel	
Kanalhöhe h_k	50 mm	(Gerkamp 2020)
Widerstandsbeiwert ζ_U	1,2	(VDI-2087)
Absolute Rauigkeit K	0,09 mm	(Stephan et al. 2019)
Kinematische Viskosität ν	19,22*10 ⁻⁶ m ² /s	(Stephan et al. 2019)
Wärmeleitfähigkeit der Luft $\lambda_{Wärme}(\vartheta_0)$	0,0288 W/(m K)	(Stephan et al. 2019)

Für den Wärmeübergangskoeffizient im Spalt in Abhängigkeit von der Spalthöhe ergibt sich der in Abbildung 51 dargestellte Zusammenhang.

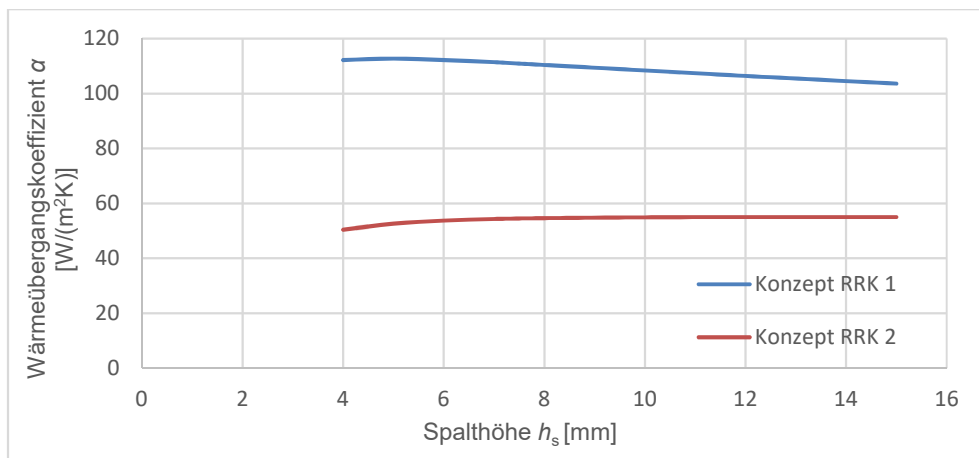


Abbildung 51: Wärmeübergangskoeffizient im Überlappungsspalt in Abhängigkeit von der Spalthöhe

Der Massenstromverlust durch den Überlappungsspalt ist in Abbildung 52 aufgeführt.

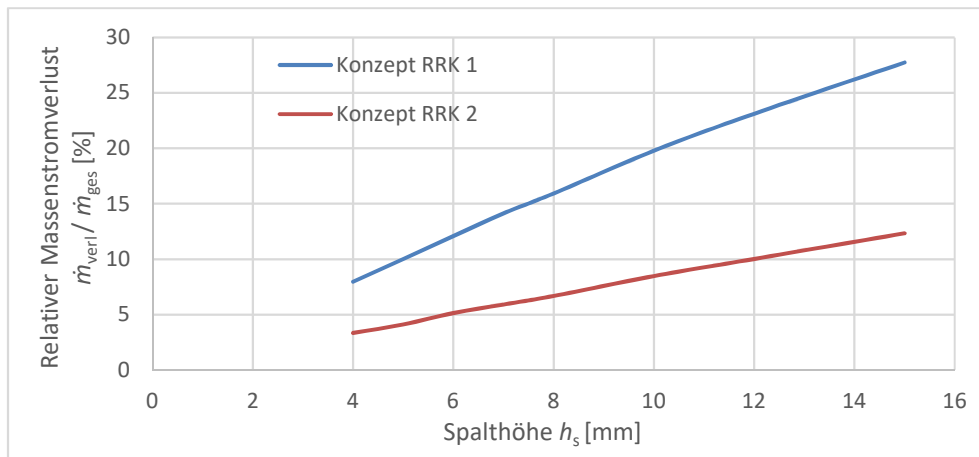


Abbildung 52: Relativer Massenstromverlust im Überlappungsspalt über die Spalthöhe

G. Übersicht aller thermischen Randbedingungen der Reflexionsfläche

Tabelle 13: Übersicht aller thermischen Randbedingungen der radialen Kontaktstelle

Größe	Wert	Quelle
Umgebungstemperatur ϑ_{amb}	40 °C	(Climate-data.org 2020)
Kanalinnentemperatur erstes Segment ϑ_{1s}	40 °C	
Kanalinnentemperatur zweites Segment ϑ_{2s}	60 °C	
Kanalinnentemperatur drittes Segment ϑ_{3s}	80 °C	
Temperatur im ersten Überlappungsspalt $\vartheta_{1üs}$	60 °C	
Temperatur im zweiten Überlappungsspalt $\vartheta_{2üs}$	80 °C	
Wärmeübergangskoeffizient reflektierende Fläche α_{Ref}	7 W/(m ² K)	(Gerkamp 2020)
Wärmeübergangskoeffizient Kanalrückseite α_{Ruek}	5,5 W/(m ² K)	(Gerkamp 2020)
Wärmeübergangskoeffizient beheizte Kanalinnenflächen $\alpha_{beheizt}$	56,4 W/(m ² K)	(Gerkamp 2020)
Wärmeübergangskoeffizient unbeheizte Kanalinnenflächen $\alpha_{unbeheizt}$	43 W/(m ² K)	(Gerkamp 2020)
Wärmeübergangskoeffizient erster Überlappungsspalt α_{1s}	54 W/(m ² K)	
Wärmeübergangskoeffizient zweiter Überlappungsspalt α_{2s}	43 W/(m ² K)	
Wärmeübergangskoeffizient konvektionsunterdrückter Hohlraum α_{Hohl}	12,75 W/(m ² K)	
Emissionsgrad hochemissive Beschichtung ε_{hoch}	0,95	(Gerkamp 2020)
Emissionsgrad polierte Oberflächen ε_{pol}	0,2	(Thermographie Xtra 2020)
Emissionsgrad unbehandelte Oberflächen $\varepsilon_{unbehandelt}$	0,3	(Thermographie Xtra 2020)